

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

JOVITA DARGIENĖ

AUSTOS STRUKTŪROS DEFORMACIJŲ  
TYRIMAS VAIZDŲ ANALIZĖS METODU

Daktaro disertacija  
Technologijos mokslai, medžiagų inžinerija (08T)

2015, Kaunas

Disertacija rengta 2010–2014 metais Kauno technologijos universitete, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultete, medžiagų inžinerijos katedroje, remiant Lietuvos valstybinio studijų fondui (2010m.) ir Lietuvos mokslo tarybai (2012 – 2013).

Mokslinė vadovė:

Doc. dr. Jurgita DOMSKIENĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T)

© J. Dargienė  
2015

## TURINYS

ĮVADAS .....	7
1. LITERATŪROS APŽVALGA .....	11
1.1 Vaizdų analizės techninių naujovių ir vystymosi tendencijų apžvalga .....	11
1.2 Vaizdų analizės metodų pritaikymas liaunų medžiagų tyrimuose.....	14
1.3 Eksperimentų, taikant vaizdų analizės metodus, sąlygų apžvalga.....	15
1.3.1 Apšvietimo sąlygos ir jų įtaka vaizdų kokybei.....	16
1.3.2 Tiriamojo objekto ir vaizdą fiksuojančios įrangos padėtis .....	17
1.3.3 Vaizdo iškraipymo reiškiniai.....	18
1.3.4 Specialus tiriamojo objekto paruošimas .....	19
1.4 Liaunų medžiagų vizualinis paviršiaus defektų (pažeidimų) vertinimas vaizdų analizės metodais.....	21
1.4.1 Tekstilinių medžiagų paviršiaus tyrimai.....	21
1.4.2 Vizualinis spalvos vertinimas .....	22
1.4.3 Tekstilinių medžiagų paviršiaus glamžumo vertinimas .....	23
1.4.4 Austos struktūros medžiagų paviršiaus nelygumo ir dėvėjimosi dėl trinties vertinimo metodikos, kriterijai, įtakos turintys veiksniai .....	24
1.5. Liaunų medžiagų deformacijų vertinimas vaizdų analizės metodais .....	25
1.5.1 Liaunų medžiagų geometriniai deformavimosi charakteristikų matavimai vaizdų analizės metodais .....	25
1.5.2 Vaizdų analizės technikų pritaikymas matmenų stabilumo tyrimuose.....	26
1.5.3 Vaizdų analizės metodai tempimo testuose.....	27
1.6 Vaizdų analizės metodų patikimumo, paklaidų vertinimo apžvalga .....	31
1.7 Literatūros apžvalgos apibendrinimas .....	32
2. TYRIMŲ METODOLOGIJOS SUDARYMAS .....	33
2.1. Tyrimo objektai .....	33
2.2. Vaizdų analizės metodas lokalių deformacijų vertinimui vienašio tempimo metu .....	36
2.2.1 Bandinių paruošimo būdo parinkimas.....	36

2.2.2. Vaizdo fiksavimo atstumo bei apšvietimo kampo įvertinimas.....	37
2.2.3. Vaizdų analizės metodikos sudarymas.....	39
2.2.4. Vertinimo rodiklių pasirinkimas.....	42
2.3 Vaizdų analizės metodas audinių paviršiaus nusidėvėjimui vertinti.....	43
2.4. Vaizdų analizės metodikos pritaikymas pradiniu įtempimu įtempto kompozito deformacinės elgsenos tyrimui gamybos bei relaksacinio proceso metu.....	44
3. TYRIMŲ REZULTATAI.....	47
3.1 Lokalių deformacijų tyrimas ir vertinimas.....	47
3.1.1 Bandinių ženklavimo būdo parinkimas.....	47
3.1.2 Vertinimo rodiklių parinkimas.....	50
3.1.3. Objekto apšvietimo ir vaizdų fiksavimo sąlygų įvertinimas.....	52
3.1.4. Vaizdų analizės metodo jautrumas tekstilės bandinio spalvai.....	55
3.1.5. Vertinimo kriterijų patikimumas ir rezultatų neapibrėžtis.....	59
3.1.5.1 Suminės kombinuotos standartinės neapibrėžties vertinimas.....	61
3.1.5.2. Suminės neapibrėžties sandų analizė.....	65
3.1.6. Ryšys tarp lokalių tempimo ir gniuždymo deformacijų įstrižo vienašio tempimo metu.....	67
4. VAIZDŲ ANALIZĖS METODO TAIKYMAS TEKSTILĖS MEDŽIAGŲ TYRIMUI IR VERTINIMUI.....	77
4.1 Dildymo įtakos audinio kokybei nustatymas vaizdų analizės metodu.....	77
4.1.1 Dildymo poveikis stiprumui ir lokalioms deformacijoms tempiant.....	77
4.1.2 Tekstilės paviršiaus defektų tyrimas vaizdų analizės pagalba.....	82
4.2 Kompozitų deformacinės elgsenos analizavimas vaizdų analizės metodu.....	88
IŠVADOS.....	95
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	96
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS.....	106
PRIEDAI.....	107



## Simbolių sąrašas

$B$	- lenkiamasis standis, $\mu\text{Nm}$
$b$	- skrituliuko plotis, mm
$CV$	- pilkumo lygių sklaida (spalvos variacijos indeksas)
$d$	- fotografavimo atstumas, mm
$F$	- jėga, N
$h$	- skrituliuko aukštis, mm
$I_1$	- vidutinė bandinio spalvos vertė
$I_2$	- vidutinė ženklinimo tinklelio spalvos vertė
$L$	- skaistis
$l$	- ilgis, mm
$l_s$	-pamatinis nedeformuoto skrituliuko ilgis
$l_e$	- matuojamas kiekvieno skrituliuko ilgis
$l_{in}$	- bandinio ( $n=1\dots 50$ ) pamatuota <i>i-tojo</i> skrituliuko tinklelio reikšmė
$l_{in}$	- vidutinė <i>i-tojo</i> skrituliuko tinklelio reikšmė
$M$	- masė, g
$Mean$	- vidutinė spalvos reikšmė
$n,m$	- vaizdo elementų skaičius, vnt
$P$	-skrituliuko perimetras, mm
$R_z$	- vidutinis mikronelygumų aukštis, mm
$R_{max}$	- didžiausias profilio mikronelygumų aukštis, mm
$RGB$	- spalvų maišymo sistema, raudona ( $R$ ), žalia ( $G$ ) ir mėlyna ( $B$ )
$S$	- deformuojamo skrituliuko plotas, $\text{mm}^2$
$S_c(\Delta l_e)$	- ilgio įvertinimo neapibrėžtis
$ST$	- paviršinis medžiagos storis, mm
$Stdev$	- standartinis spalvos nuokrypis,
$t$	- medžiagos storis, mm
$U_c(x)$	- standartinė neapibrėžtis
$U_i(y)$	- standartinė neapibrėžtis apimanti kombinuota standartinę neapibrėžtį
$w$	- paviršinis tankis, $\text{g}/\text{m}^2$
$x,y$	- matuojamo objekto matmenys $x,y$ ašyse
$Z_i$	- Profilio mikronelygumų aukštis, mm
$\Delta$	- pokytis
$\Delta I$	- pilkumo lygių skirtumas
$\Delta l_e$	- deformacija matuojama, kaip ilgio pasikeitimas
$\Delta l_{SC}$	- iškraipymai atsirandantys dėl bandinio spalvos charakteristikų
$\Delta l_F$	- iškraipymai atsirandantys bandinio tempimo metu
$\Delta l_{ab}$	- iškraipymai atsirandantys dėl fotoobjektyvo atstumo
$\Delta l_\gamma$	- iškraipymai atsirandantys dėl apšvietimo
$\Delta l_c$	- iškraipymai atsirandantys dėl kalibravimo
$\Delta l_{dp}$	- iškraipymai atsirandantys vaizdų apdorojimo metu
$\delta$	- matavimo paklaida
$\varepsilon$	- santykinis pailgėjimas, %

$\gamma$  - šoninio apšvietimo į bandinio plokštumą kampas, °  
 $\sigma$  - deformacijų santykis

### **Indeksai**

0 - pradinis  
D - dildytas bandinys  
i - kintamas indeksas  
j - laiko momentas  
N - nedildytas (kontrolinis) bandinys  
max - didžiausias (maksimalus)  
min - mažiausias (minimalus)  
vid - vidutinis  
Prad įtempimas - pradinis įtempimas

## ĮVADAS

Nestovinti vietoje šiuolaikinė tekstilės pramonė nuolat susiduria su iššūkiais. Plečiantis panaudojimo sritims kuriamos naujos tekstilės medžiagos, pasižyminčios inovatyviomis savybėmis bei tam tikrų savybių deriniais. Tobulėjant technologijoms bei mokslo pasiekimams įvairiose srityse atnaujinamos esamos ir sudaromos naujos tekstilės tyrimų metodikos, kurios užtikrina tikslius rezultatus ir išsamią informaciją. Šiuolaikiniuose moksliniuose tyrimuose plačiai taikomos vizualinės informacijos analizės metodikos padeda užfiksuoti ir išanalizuoti reikšmingą informaciją, kuri papildo rezultatus, gaunamus standartiniais tyrimo metodais [147], susidaro galimybės spręsti kompleksines problemas, tokias kaip deformacijų analizė ar tekstilės medžiagų kokybės vertinimas. Tekstilės medžiagos dėl unikalių struktūros ir lankstumo yra specifinės, daugelyje mokslo sričių išstobulinti ir pasiteisinę medžiagų tyrimo metodai joms netinka ir tenka spręsti, kaip žinomus ir sėkmingai taikomus metodus panaudoti tekstilės tyrimų problematikai.

Dar senovės graikų mąstytojas Aristotelis 350 m. iki Kristaus naudojo vaizdų analizę, kai iš skritulio formos šešėlio nustatė, kad žemė yra apvali. Pastaruosius 50 metų vaizdų analizės technikos sparčiai tobulėjo: 1964 metais buvo atliktas mėnulyje užfiksuotų vaizdų tyrimas, 1970 metais vaizdų analizavimas pritaikytas medicinoje, o nuo 1980 vaizdų analizavimo sistemos pradėtos taikyti beveik visose mokslinių tyrimų srityse, tame tarpe ir tekstilės medžiagų moksle.

Aktualių sričių atpažinimas vaizdų analizės metodų pagalba apjungia mokslą ir šiuolaikines technologijas, nes žmogus dažną kartą negali net pastebėti problemos, o vaizdų apdorojimo algoritmai suteikia reikiamas priemones iškilusių uždavinių sprendimui. Vaizdų analizės sistemos plėtojamos skirtingose mokslo bei pramonės srityse: medicinoje, astronomijoje, gynyboje, robotų technikoje, medžiagotyroje ir pan. Technologijoms sparčiai tobulėjant vaizdų tyrimas taikomas ne tik makro lygmenyje, bet tampa ypač aktualus mikroskopijoje. Vaizdų analizavimo sistemos leidžia iš vaizdų išskirti dominančią informaciją ir taip sumažinti analizuojamų duomenų kiekį, paspartinant ir palengvinant matematinės manipuliacijas su vaizdais. Skaitmeniniai vaizdų analizės metodai, kaip nekontaktiniai neardančiosios kontrolės tyrimai, yra informatyvūs, gaunamus rezultatus paprasta analizuoti, o patį procesą – automatizuoti.

### **Temos aktualumas**

Vystantis šiuolaikinėms technologijoms bei pramonei tenka spręsti naujų medžiagų tyrimo problemas. Gausi ir sparti naudojamų modernių medžiagų kaita iškelia naujus uždavinius tekstilės produktų gamintojams, apsunkina galimybę greitai ir tiksliai prognozuoti austų struktūrų elgseną. Rinkoje nuolat atsiranda naujos daugiasluoksnės medžiagos, pastarosios plačiai taikomos ne tik tradicinėje, bet ir techninėje aplinkoje. Naujos kartos medžiagos, pasižymi unikalia deformacine elgsena ir netyrinėtomis savybėmis. Tampa aktualu numanyti jų deformavimosi pobūdį ne tik technologinio proceso, bet ir eksploatacijos ciklo metu, įvertinti skersinių ir išilginių tiriamo objekto matmenų netolygų kitimą visame

deformaciniame lauke. Problemos aktualumą rodo nemažėjantis mokslinių tyrimų kiekis šioje srityje, ieškant tikslesnių ir šių dienų lūkesčius atitinkančių metodų. Objektyvus deformacinių savybių įvertinimas suteikia galimybę prognozuoti techninės (audiniu armuoto kompozito) ir daugiasluoksnės tekstilės deformacinę elgseną.

Siekiant išanalizuoti sudėtingą tekstilės medžiagų elgseną, standartiniai tyrimo metodai [x] ne visada yra pakankami. Vaizdų analizavimo metodų kūrimas bei žinomų metodų tobulinimas padeda gerinti eksperimentų kokybę, tyrimus perkeliant į aukštesnę pakopą. Tobulėjant vaizdų analizavimo priemonėms dėl didelio šių metodų universalumo lanksčių tekstilės medžiagų tyrimuose gali būti pritaikomi skaitmeniniai vaizdų apdorojimo metodai. Deformuojamų tekstilės medžiagų savybių tyrimuose įvairioms problemoms spręsti pritaikius vaizdų analizės metodiką, tyrėjams suteikiamos naujos priemonės atlikti išsamią austos struktūros medžiagų elgsenos analizę.

### **Darbo tikslas**

Vaizdų analizės pagrindu sudaryti austos struktūros deformacinės elgsenos vertinimo metodiką, bei išnagrinėti galimybes metodą taikyti medžiagų formavimosi bei paviršiaus nelygumo tyrimams.

### **Darbo uždaviniai**

1. Įvertinti sudarytos skaitmeninės optinės sistemos veikimo sąlygas, parinkti tinkamą bandinių ženklavimo būdą, vaizdo fiksavimo sąlygas bei apšvietimo kampą, užtikrinant tikslų ir patikimą liaunų medžiagų deformacinės elgsenos tempiant vertinimą vaizdų analizės metodu.
2. Nustatyti patikimus rodiklius, tinkamus įvertinti deformuojamų bandinių lokalias deformacijas.
3. Įvertinti sudaryto vaizdų analizės metodo patikimumą, pateikiant matavimų neapibrėžtis.
4. Aprašyti skirtingų austų struktūrų elgseną įstrižo veinąašio tempimo metu, įvertinti tiriamų medžiagų formos stabilumo savybes.
5. Vaizdų analizės metodiką pritaikyti audiniu armuoto kompozito deformacinės elgsenos tyrimams.
6. Vaizdų analizės metodu kiekybiškai įvertinti medžiagų paviršiaus nusidėvėjimą dėl trinties.

### **Darbo naujumas**

Darbe pristatomas išsamus vaizdų analizės metodas, skirtas austos struktūros deformacijų įstrižo vienąašio tempimo metu įvertinimui, dildymu paveiktų bei kompozitinių medžiagų deformacinės elgsenos tyrimui ir vertinimui.

Austos struktūros medžiagos, veikiamos išorinių jėgų, lengvai praranda savo pradinę formą, audiniuose pasireiškia netolygios skersinės ir išilginės deformacijos, stebima išorinių veiksnių įtaka. Deformacinei elgsenai prognozuoti dažniausiai naudojami vienąašio tempimo eksperimentai. Šiame darbe standartinis vienąašio

tempimo tyrimas papildytas bekontakto vaizdų analizavimo sistema, padedančia išsamiai aprašyti tiriamų medžiagų elgseną, nustatyti lokalių deformacijų vertes, pasiskirstymą bei veikimo zonas. Pasiūlyta vaizdų analizės metodu įvertinti austos struktūros medžiagų paviršiaus mikronelygumus bei vaizdų analizės metodiką pritaikyti su pradinių įtempimu įtemptų kompozitų deformacinės elgsenos tyrimams jų gamybos bei relaksacinio proceso metu.

Siekiant vaizdų analizės metodu įvertinti austų struktūrų elgsenos pasikeitimus atliekamas laminuotų ir nelaminuotų medžiagų deformacinių savybių palyginimas. Tuo tikslu parinkta originali bandinių paruošimo metodika, nustatyta optimali tyrimų seka ir pasiūlyti keli rezultatų vertinimo kriterijai.

Siekiant paaiškinti austų struktūrų formavimosi problemas, kai įstrižai kirptuose bandiniuose pasiekus kritines šlyties deformacijų vertes medžiaga praranda savo pradinę formą ir susibanguoja, neužtenka nustatyti vidutinės deformacijų reikšmes, vaizdų analizavimo metodikos pritaikymas padeda nuodugniau iširti ir aprašyti deformacijų netolygumą visame deformaciniame lauke.

Kuriant naujus vaizdų analizavimo metodus dažną kartą tyrimų metodologijos sudaryme pasigendama nuodugnesnio eksperimento sąlygų bei gautų rezultatų patikimumo įvertinimo. Analizuojant tekstilės medžiagas, tokie faktoriai kaip medžiagos paviršiaus savybės, fotoobjektyvo optiniai iškraipymai, apšvietimo bei fotografavimo sąlygos, turi įtakos gaunamų rezultatų patikimumui.

Sudaryta vaizdų analizės metodika įgalino skaitmeniniame vaizde atlikti ženklinimo tinklelio geometrinius matavimus, kurių pagrindu prognozuojama austos struktūros medžiagų elgsena dinaminėje aplinkoje eksploatavimo apkrovų sąlygomis. Parinkti nauji deformacijų vertinimo  $\Delta b$  ir  $\Delta h$  kriterijai tinkami analizuoti netolygų skersinių ir išilginių deformacijų santykį bei aprašyti deformacijų pasiskirstymą bandinyje. Nustatytos sukurto vaizdų analizės metodo metrologinės charakteristikos, apskaičiuota išplėstinė matavimo neapibrėžtis, leidžia teigti, kad gaunami patikimi matavimo rezultatai.

Sudaryta bekontakto vaizdų analizavimo metodika gali būti panaudojama kaip efektyvi austos struktūros medžiagų savybių vertinimo priemonė, pritaikoma audinių kokybės prognozavime bei naujų audinių kūrime.

#### **Ginamieji teiginiai:**

1. Sudarytas bekontakto tyrimų metodas, pagrįstas skaitmeninių vaizdų analize, gali būti pritaikomas studijuojant austos struktūros medžiagų elgseną. Pasirinktu laiko momentu laiko momentu gali būti apskaičiuojamos išilginės ir skersinės deformacijos bet kurioje tempiamo bandinio vietoje, nustatomos deformacijų zonos bei jų santykis.
2. Austos struktūros medžiagose gali būti prognozuojamos klupimo raukšlės susidarymo sąlygos, pasireiškiantis skersinių ir išilginių bandinio deformacijų netolygumu, kuris gali būti įvertintas ženklinimo tinklelio elemento pločio ir aukščio pokyčio rodiklių santykiu.

3. Laminuotų sistemų didėjantis lokalių deformacijų pasiskirstymo tolygumas, lyginant su nelaminuotais tais pačiais bandiniais, paaiškina teigiamą laminavimo įtaką austos struktūros formos pastovumui.
4. Taikant vaizdų analize pagrįstą originalų austų struktūrų paviršiaus kokybės vertinimo metodą nustatytas vidutinis ir didžiausias profilio mikronelygumų aukštis, įvertintas austos struktūros pažeidimo laipsnis, bei išorinių veiksnių įtaka austos struktūros medžiagų paviršiaus kokybei jų dėvėjimo metu.

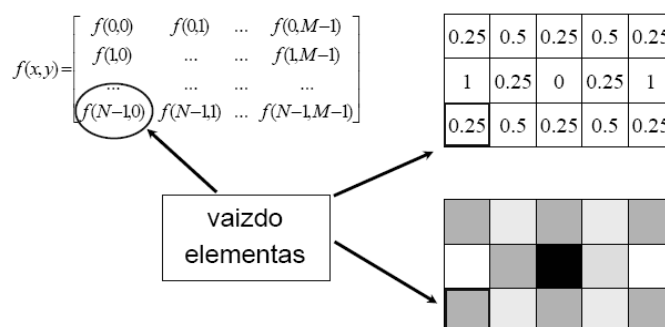
# 1. LITERATŪROS APŽVALGA

## 1.1 Vaizdų analizės techninių naujovių ir vystymosi tendencijų apžvalga

Šiomis dienomis didėjant informacijos bei duomenų kiekių srautams, moksliniuose tyrimuose bei pramonėje vis dažniau į pagalbą pasitelkiamas informacijos vizualizavimas, tyrimams pritaikomi vaizdų analizės metodai. Šie metodai naudojami medicinoje, mikroskopijoje, astronomijoje, gynyboje, medžiagotyroje, robotų technikoje, dokumentų apdorojime [1]. Pritaikius vaizdų analizavimo technikas, pagreitinami tyrimo procesai, padididinamas matavimų tikslumas, taip pat sumažinami tyrimo kaštai.

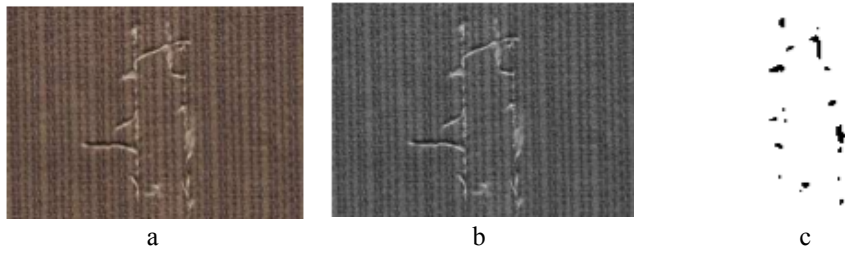
Behera B.K. [2], nagrinėdamas vaizdų analizės procesus, teigia, kad vaizdų analizės metodai reikalauja pamatinių optikos teorijos žinių, vaizdo susidarymo principų išmanymo, kas įgalina teisingai nustatyti pradines eksperimento sąlygas bei gauti patikimus bei informatyvius tyrimų rezultatus.

Eksperimentų metu gaunamas *skaitmeninis vaizdas* (angl. digital image) – matematinio skaičiavimo rezultatas, apibrėžiamas, kaip dvimatis skaičių masyvas, nusakomas funkcija  $f(x, y)$ , kur  $x$  ir  $y$  – koordinatės plokštumoje, sudarytos iš pikselių,  $x$  (eilučių) ir  $y$  (stulpelių) kryptimi (1.1 pav.), čia  $x$  ir  $y$  yra sveikieji skaičiai [3].



1.1 pav. Skaitmeninė matrica: skaičių eilutės ir stulpeliai [3]

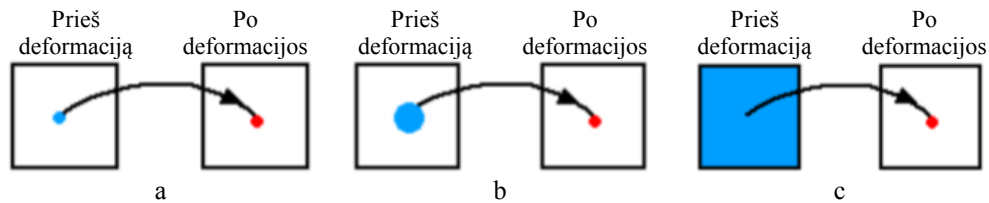
Skaitmeniniai vaizdai – dvimačiai, trimačiai paveikslėliai, kurie atvaizduojami spalviniais regionais (1.2 pav. a). Spalvoti vaizdai (gali būti naudojamos XYZ, RGB, CMYK, CIELAB, HSB skalės) pateikiami žmogui matomo spektro diapazone. *Pilkosios skalės* (angl. gray-scale) (1.2 pav. b) vaizdai apibūdinti naudojami aštuoni bitai, kurie leidžia atvaizduoti 256 pilkumo lygius, kai visiškai balta spalva nusakoma skaičiumi 255, o absoliučiai juoda – 0. Pilkosios skalės vaizdai naudojami vaizduose, kuriuose analizuojamos profilio kreivės, pilkumo lygio histogramos bei pilkumo lygių skirtumai [4-6]. *Dvispalviam* (angl. binary) vaizdo elementui apibūdinti užtenka vieno bito (1.2 pav. c). Šį vaizdą sudaro dvi spalvos: 0 – juoda ir 1 – balta. Dvispalvis vaizdas naudojamas geometrinuose matavimuose bei skaičiuojant objektų užimamus plotus [7-8]. Atliekama nemažai tyrimų, kai spalvotas vaizdas konvertuojamas į pilkosios skalės ar dvispalvį, siekiant išgauti reikšmingą informaciją [9-12].



**1.2 pav.** Skaitmeninis tiriamojo objekto vaizdas: a - spalvotas vaizdas, b – pilkosios skalės vaizdas, c – dvispalvis vaizdas [12]

Optikos principais pagrįstos šiuolaikinės sistemos leidžia ne tik kokybiškai užfiksuoti ir atkurti tiriamo objekto vaizdą skaitmeninėje formoje, bet ir atlikti tam tikrą jo analizę. Vaizdų analizę sudaro vaizde esančių komponentų (sričių) klasifikavimas pagal aptiktus požymius.

Pačias vaizdų apdorojimo operacijas galima klasifikuoti įvairiais būdais. A. Watt ir F. Policarpo [13] siūlo atlikti grupavimą pagal vaizdų apdorojimo būdą (1.3 pav.): *taškinė* analizė (pikslio reikšmė priklauso tik nuo pradinio vaizdo pikselio su tomis pačiomis koordinatės reikšmėmis), *lokali* analizė (pikslio reikšmė priklauso nuo tas pačias koordinates turinčio pradinio vaizdo pikselio ar aplinkos reikšmių), *globali* analizė (pikslio reikšmė priklauso nuo viso pradinio vaizdo pikselio reikšmių) (1.4 pav.).



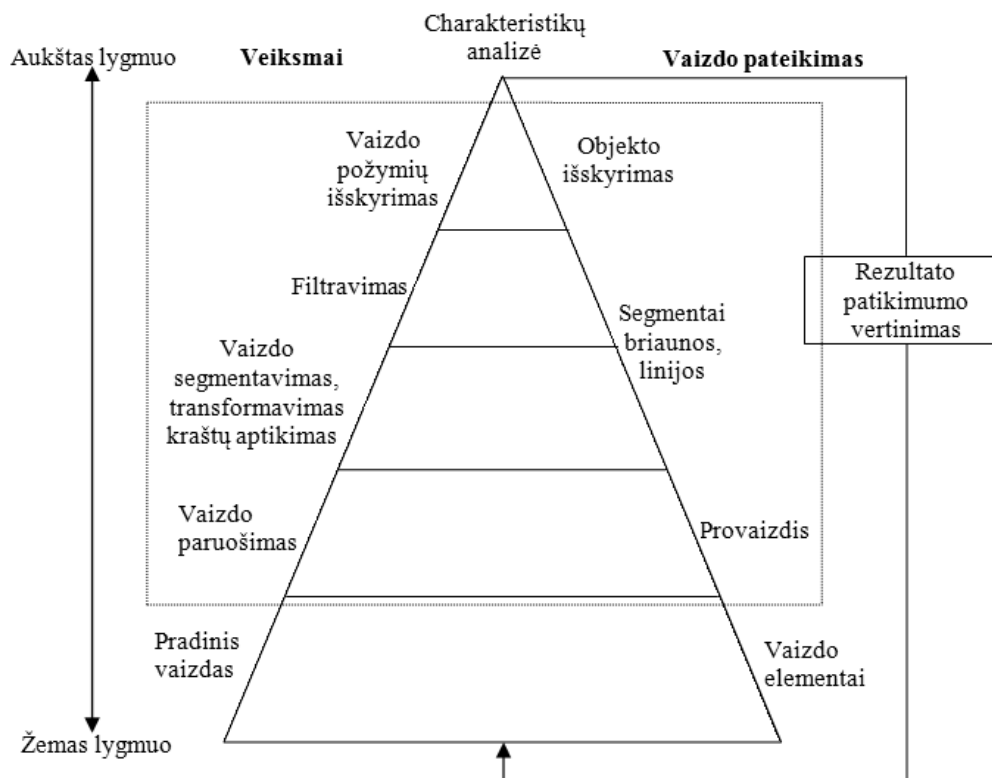
**1.3 pav.** Vaizdų apdorojimo būdai: a – taškinė analizė; b – lokali analizė; c – globali analizė

Vaizdų apdorojimo metu siekiama manipuluoti vaizdu, norint gauti pagerintą vaizdą, kuomet nors besiskiriantį nuo pradinio, tokiu būdu išskiriant dominančius regionus [13]. Objektivi vaizdų analizė susideda iš labai didelio duomenų kiekio, išskiriant dominančią informaciją, bei atliekant dominančių sričių charakteristikų analizę. Taigi vaizdų analizės užduotis nustatyti mažesnių žingsnių seką, skirtą tiriamai problemai spręsti, sumažinti nereikšmingos informacijos kiekius, kiekvieno etapo pabaigoje pagerinti vaizdą. Baigiamajame etape atliekamas vaizdo požymių išskyrimas iš aplinkos [2].

Svarbu paminėti, kad vaizdų analizė susideda iš siauresnių sričių (1.5 pav.), tokių kaip:

- vaizdų paruošimas,
- vaizdų pakeitimas ir suskirstymas,
- vaizdų filtravimas,
- požymių išskyrimas,
- charakteristikų analizė.





1.4 pav. Vaizdų analizės procesas [2, 14]

*Vaizdų suskirstymo* (angl. image segmentation) tikslas yra padalinti vaizdą į vienas sritis, kurios būtų maksimaliai homogeniškos spektrinių charakteristikų požiūriu (1.4 pav.). Suskirstymo metu nagrinėjamos vaizdo sritys išskiriamos iš pirminio vaizdo bei ieškomi elementai, turintys vienodas objekto savybes, taigi gali būti nagrinėjami pilkumo atspalviai, tekstūra, akcentuojamos kontrastinės savybės ties objektų ribomis. Tai viena iš sudėtingiausių vaizdų apdorojimo problemų. Segmentavimo procesas grupuojamas į 3 etapus:

- *kraštų arba briaunų* (angl. *Edge detection*) vaizde nustatymas. Objekto kontūrų radimas yra viena iš pagrindinių užduočių daugelyje kompiuterinių vaizdų analizės sistemų. Dažniausiai šios užduoties tikslas nustatyti bei išskirti objektų kontūrus. Pati kontūro briauna traktuojama kaip tono išvestinė ir fiksuojama kaip riba tarp dviejų tonų, atsirandanti tam tikra tvarka pasiskirsčius šviesai, priklausanti nuo apšviestumo, apšviestumo tolygumo, fotografavimo taško, fotoaparato parametrų ir t.t. Vaizdo apdorojimui keliant specifinius, siauresnius reikalavimus, kai yra žinomos tiriamų objektų savybės, jų forma bei faktūra, supaprastinamos briaunų aptikimo galimybės, sumažinamos klaidų atsiradimo tikimybės [15].
- *duomenų grupavimas* (angl. *Clustering*). Homogeniškų spektrinių sričių nustatymas.

- *vaizdo filtravimas*. Šiame etape yra pašalinami susidarę triukšmai ir specialūs efektai. Šio etapo metu pagerinama vaizdo kokybė. Charakteristikų nustatymas apima informacijos išgavimą, pakitimų nustatymą, fizinių dydžių išskyrimą, tam tikrų elementų nustatymą [14].

## 1.2 Vaizdų analizės metodų pritaikymas liaunų medžiagų tyrimuose

Vaizdų analizavimo technologijos liaunų medžiagų tyrimuose buvo pradėtos vystyti nuo 1960 metų. Tuo laikotarpiu, pasitelkus vaizdų analizę, daugiausia buvo tiriama tekstilės medžiagų kokybė, nustatomos tekstilės medžiagų paviršiaus charakteristikos. Nuo 1980 metų vaizdų analizės technikos pradėtos naudoti deformacinių tekstilės savybių vertinimui [2, 16].

Kadangi vaizdų analizės metu sprendžiami nevienodi uždaviniai, tai ir kiekvienu individualiu atveju problemos sprendimo būdai skiriasi [2]. Būtina išanalizuoti jau sukurtas metodikas, skirtas liaunų medžiagų vertinimui, atsižvelgiant į atskirų metodų specifiką. Galima išskirti keletą probleminių sričių, tai: vaizdų gavimo sąlygos, vaizdų analizavimo metodikos bei gautų rezultatų patikimumo vertinimas.

Liaunų medžiagų tyrimus galima suskirstyti į plokštuminius, dvimačius ir erdvinius (trimačius) [17-18]. Šiems matavimams naudojamos skirtingos vaizdų analizavimo technikos, tokios, kaip, holografija, speklų lazerinė [19-21] ir moiré interferometrijos [22-23], vaizdų analizės [9, 24-26] bei skaitmeninių vaizdų koreliacijos (*angl. Digital Image Correlatinon (DIC)*) metodas [27-31].

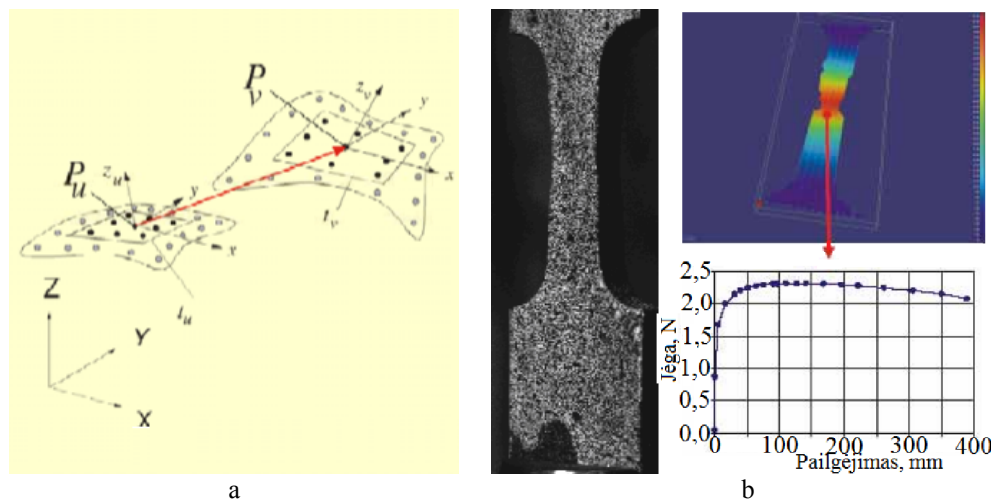
Barnetos (2004m.) lokaliems plokštuminiams poslinkiams nustatyti pritaikė interferometrinį metodą [20], pagrįstą vaizdų matematine analize, kur realiu laiku užfiksuojamos ant aliuminės plokštelės skirtingai išsibarsčiusios šviesos bangos. Arial Y. (2009 m.) pritaikė interferometrinį metodą ir jį panaudojo plonos plėvelės deformacijos vertinimui. Kiti mokslininkai tyrė idealizuotus tekstilės pavyzdžius, pritaikydami *moiré juostų metodą* tekstilės medžiagos paviršiuje matuoti linijų poslinkius. Susidariusių *moiré juostų* vaizdas parodė dinaminių deformacijų, harmoniškai kintančių laike, amplitudžių dydžius [22-23]. Tyrimai, atliekami šiais metodais, vykdomi laboratorijose, pritaikant specialią įrangą, reikia papildomo paviršiaus paruošimo [19-23], taikant metodą sudėtinga išmatuoti akytą (nevientisą) tekstilės medžiagų paviršių. Kitas svarbus aspektas yra kaina, kuri išauga dėl tekstilės eksperimentuose naudojamos nemažos bandinių imties.

Naudojant neinterferometrines priemones, tokias kaip vaizdų analizė ir skaitmeninės koreliacijos metodai, tekstilės bandinių paviršiaus pakitimai išmatuojami pagal pilkosios skalės intensyvumo pokyčius [9, 18, 24-31]. Vaizdai atpažįstami analizuojant nuotraukas šiam tikslui skirtomis programomis. Jomis galima apskaičiuoti plotą, matuoti atstumus, kampus, sukurti tankio histogramas ir paviršiaus profilio linijas. Vaizdų apdorojimo programos palaiko standartines vaizdo apdorojimo funkcijas, tokias kaip kontrasto reguliavimas, ryškinimas, vaizdo išlyginimas, briaunų aptikimas bei vaizdo filtravimas [13].

Vaizdų analizės metodikos tekstilės medžiagų savybėms tirti skirstomos į kelias grupes:

1 grupė. Tekstilės medžiagų paviršiaus savybių vertinimas VA metodais (vizualinis spalvos vertinimas [32-34], paviršiaus pažeidimų (defektų) nustatymas [35-37], atsparumo pumpuravimuisi vertinimas [38-43], medžiagos glamžumo vertinimas [13, 44-47], tekstilės medžiagų kokybės kontrolė: siūlų, austinių, mezginių, neaustinių medžiagų struktūros vertinimas [26, 48-49]), tekstilės medžiagų sandaros nustatymas (audinio paviršiaus užpildymo rodiklis), audinio tankumo įvertinimas [50-51].

2 grupė. Liaunų medžiagų deformacinių savybių vertinimas vaizdų analizės metodais [2, 52-53]. Gali būti atliekamas geometrinių charakteristikų matavimas [54-57], mechaninių savybių vertinimas [9, 25, 58-59].



**1.5 pav.** Skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodas: a – deformuojamo paviršiaus elemento poslinkio vektorius; b – deformacinių savybių vertinimas

3 grupė. Skaitmeninės koreliacijos metodas, tinkamas deformacijų tyrimams (1.5 pav.) [60]. Skaitmeninio vaizdo koreliacijos procesą nulemia vaizdo pasikeitimas, pasisukimas bei jo iškraipymas. Koreliacijos mechanizmas pagrįstas pilkumo reikšmių skalės stebėjimu, vaizde nustatomas deformuojamo paviršiaus elemento poslinkio vektorius, stebint tašką P (1.5 pav. a), charakterizuojama deformuojamo objekto padėtis (1.5 pav. b) [60]. Šis metodas yra progresyvus, pastaruoju metu plačiai taikomas komerciniuose programiniuose paketuose.

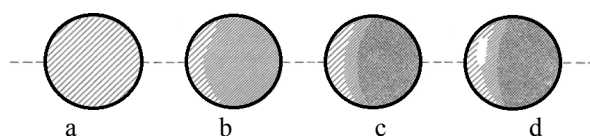
### 1.3 Eksperimentų, taikant vaizdų analizės metodus, sąlygų apžvalga

Eksperimentuose pritaikant vaizdų analizės metodą pagrindinis uždavinys – gauti patikimą tiriamojo objekto ar jo dalies vaizdą, t. y. skaitmeniniuose vaizduose užfiksuotas objektas turi būti neiškraipytas, gerų vaizdumo savybių, kai visame vaizdo plote esantys elementai yra ryškūs, geras kontrastas, sodrumas, ryškumas, detalumas [2]. Apžvelgiant žinomus darbus, kuriuose buvo taikomos vaizdų analizavimo sistemos, galima išskirti keletą svarbiausių veiksnių, lemiančių

gaunamų rezultatų kokybę [61]: apšvietimo sąlygos, atstumas tarp objekto ir fotoaparato, optinis vaizdo iškraipymas, tiriamo objekto paruošimas.

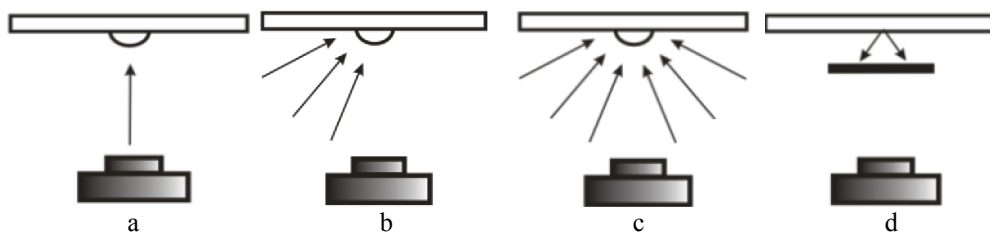
### 1.3.1 Apšvietimo sąlygos ir jų įtaka vaizdų kokybei

Kaip B.K. Behera pabrėžia [2], tinkamas tiriamojo objekto apšvietimas yra vienas svarbiausių veiksnių, darančių įtaką atkuriamų skaitmeninių vaizdų ir jų analizavimo kokybei. Kokybiškas apšvietimas leidžia gauti pakankamą vaizdo kontrastą ir raišką. Aplinkos šviesa eksperimentuose dažnai yra nepakankama, todėl yra naudojamas dirbtinis objekto apšvietimas, parenkant apšvietimo sistemą pagal sprendžiamą problemą. Svarbu, kad viso eksperimento metu skirtingais laiko momentais apšvietimas išliktų pastovaus intensyvumo ir krypties, nes apšvietimo sąlygos labai svarbios, atkuriant objekto apimtį ir faktūrą [61]. Tinkamai neparinkus apšvietimo, nukenčia vaizdo kokybė, iškreipiama objekto forma, neatskleidžiamos tiriamo objekto ypatybės, kas apsunkina pačios problemos sprendimą. Apšvietimo įtaka atskleidžiama 1.6 paveiksle, kai keičiamas apšvietimo kampas: 1.6 paveikslo a atveju figūra atrodo plokščia, b, c, d, atvejais - erdvinė [62].



1.6 pav. Apšvietimo įtaka realiams objekto matmenims: a – tolygiai apšviestas objektas; b, c, d – netolygiai apšviestas objektas [62]

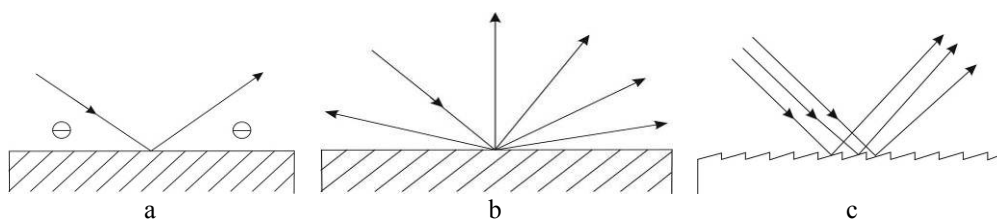
Mokslinių tyrimų metu tiriami objektai apšviečiami įvairiais būdais. Dažnai naudojamas frontalinis [63], šoninis [4, 18, 57], kontūrinis apšvietimas [2].



1.7 pav. Tiriamojo objekto apšvietimo būdai [2]: a – frontalinis apšvietimas, b – šoninis vienos lempos apšvietimas, c – šoninis dviejų lempų apšvietimas, d – kontūrinis apšvietimas

Naudojant frontalinį apšvietimą (1.7 pav., a), šviesos šaltinis statomas statmenai į tiriamo objekto plokštumą. Tokiu būdu apšviečiamas visas bandinio plotas. Frontalinis apšvietimas leidžia išgauti didelį tiriamų paviršių kontrastą, kas svarbu išskiriant tiriamąjį objektą [64]. Taikant vienakryptį apšvietimą (1.7 pav., b) išryškinami net ir nežymūs paviršiaus pakitimai [65], jis labai tinkamas fiksuoti išgaubtus paviršius, tačiau padidėja informacijos iškraipymo galimybė; toks apšvietimo tipas blogiau užfiksuoja įgaubtus paviršius [4]. Naudojant dviejų lempų (1.7 pav., c) šoninį apšvietimą, išryškinamos visos tiriamo objekto savybės, gerai

užfiksuojami paviršiaus nelygumai. Kontūrinis objekto apšvietimas (1.7 pav., d), kai objektas yra peršviečiamas, dažniausiai naudojamas geometriniais matavimams atlikti bei užfiksuoti audinio struktūros pasikeitimus [66].



**1.8 pav.** Apšvietimo atspindėjimo būdai [2]: a – veidrodinis atspindėjimas, b – išsklaidytas atspindėjimas, c – kryptinis atspindėjimas

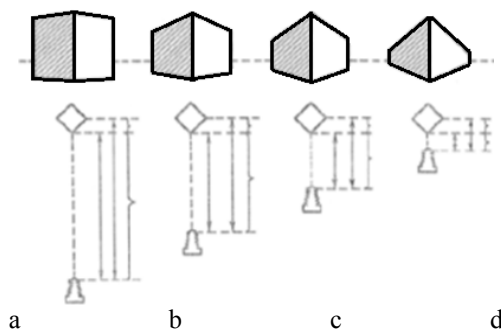
Apšvietimo būdas ir šviesos šaltinio tipas parenkamas atsižvelgiant į tiriamos problemos pobūdį. Nuo šviesos sklaidimo kampo priklauso tiriamų objektų paviršiaus apšvietimo kokybė bei šešėlių susidarymas. Tekstilės medžiagos pasižymi nelygiu paviršiumi bei skirtingomis optinėmis charakteristikomis (1.8 pav.), nuo apšvietimo tipo bei krypties priklauso šviesos lūžio kryptis, tai gali lemti tyrimų rezultatus. Siekiant eksperimento metu išlaikyti pastovias vaizdų fiksavimo sąlygas, dažnai naudojamas objektų skenavimas. Skenuojant objektas apšviečiamas kontūriniu apšvietimu, todėl užfiksuojami vaizdai tinkami geometrinių dydžių matavimui, tam tikrų charakteristikų analizavimui. Skirtingais kampais apšviečiant tiriamą objektą, galime tirti skirtingas bandinių charakteristikas [2, 4].

Eksperimentuose dažnai naudojami standartiniai šviesos šaltiniai: kaitrinės, gyvsidabrio garų, natrio garų ir kitos lempos [2]. Siekiant pagerinti vaizdo kokybę, vietoj standartinio baltos šviesos apšvietimo gali būti pritaikomi *šviesos diodai* (angl. light-emitting diode) [63]. Liuminescencinės lempos sukuria išskaidytą, šaltai baltą šviesą, jos naudojamos, kai reikia tolygiai apšviesti tiriamą paviršių. Halogeninės lempos yra didelio intensyvumo ir plataus spektro šviesos šaltiniai. Halogeninį šviesos šaltinį galima pritaikyti tiriant optinius pluoštus, jis nukreipia šviesą į konkrečius taškus. Ultravioletinės lempos (UV) naudojamos, kai reikia iš aplinkos išskirti konkrečius tiriamus objektus [2].

### 1.3.2 Tiriamojo objekto ir vaizdą fiksuojančios įrangos padėtis

Vaizdo fiksavimo sąlygų parinkimas yra dar vienas svarbus sandas, dažnai lemiantis gaunamų rezultatų patikimumą. Geometrinės objekto formos gali keistis dėl to, kad, pakreipus objektyvo optinę ašį kuriuo nors kampu į objektą, viena jo dalis labiau nutolsta nei kita, todėl gali būti iškreipta tiriamo objekto forma. Tiriamo objekto padėtis erdveje nustatoma trimis koordinatėmis [63]: 1 – fotografavimo atstumas [29] (1.9 pav.), nustatomas pagal fotoaparato objektyvo parametrus bei patikslinamas eksperimentiniu keliu; 2 – fotografavimo taško aukštis, nustatomas pradinėje eksperimento stadijoje, fotoaparato objektyvo centras fiksuojamas frontaliai objekto plokštumai, toje pačioje linijoje, kaip ir bandinio centrinė vidurio linija; 3 – fotografavimo kryptis, kuri parenkama taip, kad vaizdo kameros objektyvo ašis būtų statmena (arba artima statmenai) fotografuojamo objekto

atžvilgiu [27, 67], priešingu atveju, žinant kameros pasvirimo kampą, turi būti paskaičiuojama matavimo paklaida [30].



**1.9 pav.** Fotografavimo atstumo įtaka objekto vaizdo optiniams iškreipymams: a, b, c, d – skirtingais fotografavimo atstumais užfiksuotas objektas [62]

Ekspperimentuose vaizdų fiksavimui naudojami skeneriai, fotokameros bei greito vaizdo fiksavimo kameros. Kaip buvo minėta 1.3.1 skyriuje, skeneris užtikrina griežtų eksperimento sąlygų palaikymą, tačiau toks vaizdų fiksavimo būdas tinkamas tik ribotoms problemoms spręsti. Ultra greitos kameros naudojamos siekiant per sekundę užfiksuoti nuo 1000 iki 100000 vaizdų. Ekspperimentuose dažniausiai naudojamos fotokameros.

Aprašant eksperimento sąlygas dažną kartą neužsimenama, koks atstumas yra tinkamas. Per mažas fotografavimo atstumas tyrimo objektą išdidins, tokiaime vaizde pasireikš optiniai iškreipimai, per didelis fotografavimo atstumas sumažins iš vaizdo išskiriamų smulkių objektų kiekį. Tyrėjai įvertino fotografavimo atstumo įtaką, pasirinkdami 20 cm ir 40 cm fotografavimo atstumus, 40 cm atstumas buvo tinkamesnis [29]. Kito straipsnio [4] autorės bandinio klupdymo raukšlės įvertinimui pasirinko 30 cm fotografavimo atstumą. Didžiąja dalimi fotografavimo atstumo parinkimas priklauso nuo fotoaparato techninių parametrų, tiriamos problemos pobūdžio, tačiau negalima nuneigti, kad fotografavimo atstumas turi didelę įtaką gaunamų rezultatų patikimumui, tai dar kartą patvirtina R. Cintron ir V. Saouma teigdami [61], kad vienas iš veiksnių, nuo kurio priklauso gauto vaizdo patikimumas, yra fotografavimo atstumas.

### 1.3.3 Vaizdo iškreipimo reiškiniai

Skaitmeniniuose tiriamojo objekto vaizduose gali pasireikšti optiniai iškreipimai (angl. *distortion*) – tai optinė sistemos klaida, atsirandanti dėl nevienodo įvairių atvaizdo dalių ilginio didinimo. Vaizdas iškreipomas atsispindėjusiems šviesos spinduliams patekus į objektyvą, skiriasi fiksuojamo objekto matmenys vaizdo centre ir kraštuose.

Gali būti kelios optinių iškreipimų priežastys: 1 – optiniai jutikliai: vaizdo pakraščio zonose, lyginant su centrine sritimi, atsiranda tamsesnės sritys; 2 – objektų paviršiaus netolygus apšviestumas; 3 – aplinkos įtaka, kai pasireiškia įvairūs šviesos spinduliuotės reiškiniai, sukeliantys šviesos absorbciją ir išsklaidymą.

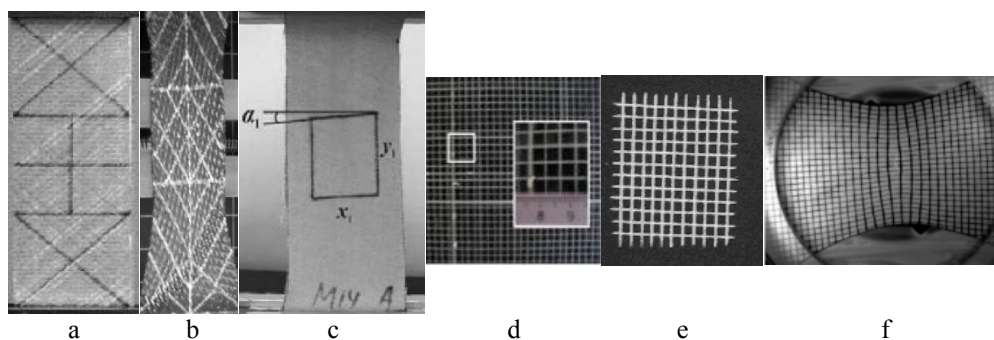
Optiniai iškraipymai mažiausiai stebimi objektyvo centrinėje dalyje, iškraipymai stiprėja tolstant objekto fokusavimo taškui nuo fotoobjektyvo optinės ašies [63]. [62] literatūros šaltinyje minima, kad, norint išvengti optinių iškraipymų, turi būti naudojama centrinė nuotraukos dalis. Kito straipsnio autoriai [29] teigia, kad objektyvo lęšio poveikis minimizuojamas griežtai laikantis tų pačių eksperimento sąlygų, kur eksperimento metu bandiniai fotografuojami iš to paties fotografavimo taško, tuo pačiu fotoaparatu (prieš ir po deformacijos), todėl atsiradusių iškraipymų galima nepaisyti.

### 1.3.4 Specialus tiriamojo objekto paruošimas

Tam tikroms problemoms spręsti gali būti naudojamas specialus tiriamojo objekto ženklavimas. Metalams, plastikams naudojami elektrolitai, lazeriai, jautri šviesai derva arba dažai, perspaudžiami per trafaretą [68]. Tekstilės bandinių ženklavimui naudojamos skaitmeninės technologijos arba rankinis ženklavimas.

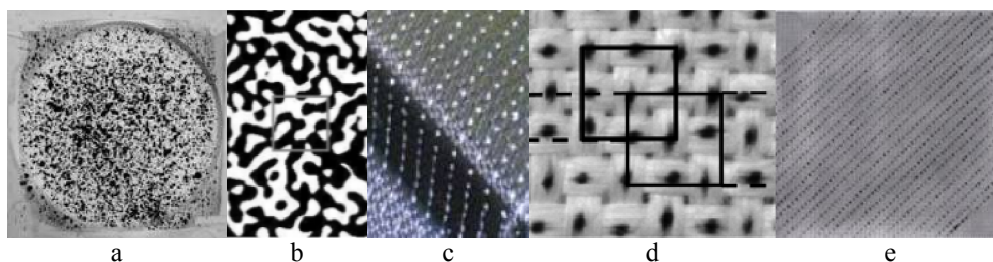
Bandiniai ženklavami, kai ant tiriamo paviršiaus užnešamas tam tikras reguliarus [9, 33, 69-80] ar chaotiškas tinklėlis [81-82], kuris vėliau naudojamas analizuojant patį objektą. Dažniausiai šis metodas taikomas tiriant plokščiąsias [70-75] ir erdvinės bandinio deformacijas [76-77]. Specialus tiriamų objektų ženklavimas pritaikomas daugelyje mokslo krypčių, tokių kaip medicina, medžiagotyra (metalai, plastikai, polimerinės plėvelės, tekstilė, popierius), kraštovaizdžio tyrimai, kriminalistika, mikroskopija, astronomija [1]. Pavyzdžiui, pasitelkiant virtualų tinklėlį, atliekamas landšafto tyrimas [83], medicinoje – kepenų netolygių deformacijų vienašio tempimo metu vertinimas [84], o naudojant nereguliarių taškelių ženklavimą, kaulų [85] deformacinių savybių tyrimas.

Tiriant objekto deformacijas keičiantis apkrovai, pakankamą tikslumą galima išgauti naudojant reguliarių linijų tinklėlį (1.10 pav.) [69]. Šis bandinių paruošimo būdas yra nesudėtingas, o bandinių žymėjimą daugeliu atvejų galima atlikti paprastomis priemonėmis. Reguliarus tinklėlis naudojamas nustatant tempimo, gniuždymo ir šlyties deformacijas, nagrinėjant lokalius bandinių geometrijos kitimus ir pan. Tyrimai gali būti atliekami ir su virtualiu tinkleliu [86-87], tiriant metalų po cheminio apdoravimo [86], kompozitų nuovargio problemas [87].



1.10 pav. Bandinių ženklavimas taisyklingų linijų tinkleliu: a – atskirų zonų ženklavimas [70]; b – ženklavimas įstrižomis linijomis [71]; c – centrinės dalies ženklavimas [72]; d, e, f – ženklavimas statmenai susikertančių linijų tinkleliu [73-75]

Bandiniai gali būti ženkljami taškelių tinkleliu (1.11 pav.), kai taškeliai išdėstomi reguliariai arba chaotiškai. Bandinius ženklinant chaotišku taškelių tinkleliu, pastarasis turi būti užneštas kokybiškai, užtikrinant pakankamą kontrastą. Rekomenduojama užtikrinti, kad taškeliai būtų skirtingos formos ir dydžio: maži, vidutiniai ir dideli [81]. Kaip teigiama straipsnyje, maži taškeliai turi būti sudaryti iš 10 pikselių, vidutiniai – iš 20 pikselių, dideli – iš 30 pikselių. Autoriai rekomenduoja, kad taškeliai bandinio vaizde nebūtų didesni kaip 30 pikselių. Kiti autoriai [80] teigia, kad taškelių dydis neturi viršyti 0,6 mm (1.11 pav., e). Bandinių žymėjimas chaotišku taškelių tinkleliu tinkamas automatinėms vaizdų analizavimo sistemoms, todėl dažniausiai naudojamas taikant skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodą [88-91]. Naudojant reguliariai išdėstytą taškelių tinkelį, gali būti pažymima tam tikra bandinio dalis [78] arba visas tiriamojo objekto paviršius [79-80].

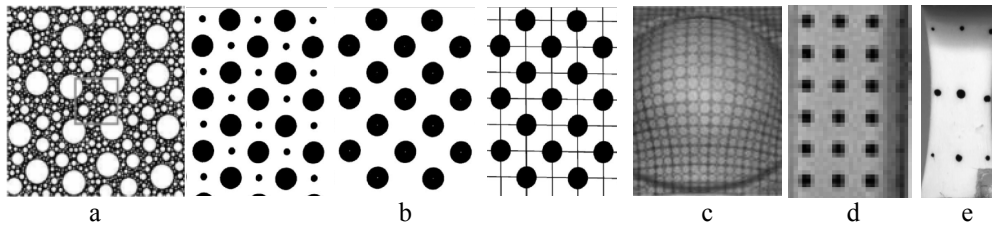


**1.11 pav.** Bandinių ženklinimas taškelių tinkleliu: a, b – chaotiškos struktūros tinklelis [81-82]; c, d, e – reguliarios struktūros tinkleliai [78-80]

Dažnai mokslininkai bandinių ženklimui siūlo naudoti skrituliukų tinklelius (1.12 pav.). Straipsnyje [92] pateikiami trys skirtingi ant bandinių užnešamo tinklelio tipai (1.12 pav., b). Pirmuoju atveju ant bandinių paviršiaus atspausdinti skirtingo dydžio, tačiau taisyklingai išdėstyti skrituliukai. Antruoju atveju buvo užneštas vienodo dydžio skrituliukų tinklelis, o trečiuoju būdu skrituliukai sujungti horizontaliomis ir vertikaliomis linijomis. Vertinant metalo lakštus po smūgio, ant bandinių užnešamas 4,2 mm skersmens nepertraukiamų skrituliukų tinklelis [68], padedantis išmatuoti tikruosius įtempius. Reguliarių skrituliukų tinklelis tinkamas liaunų medžiagų tyrimuose, tokiu būdu galima tirti lokalias tempimo, gniuždymo, sukimo deformacijas, nustatyti deformacijų pasiskirstymo tolygumą ir pan. [9, 33, 68, 82, 93].

Liaunų medžiagų pradinės charakteristikos bei savybės gali pakisti nuo bandinių ženklimui naudojamų dažų, kurių sudėtyje yra labai daug įvairių junginių ir medžiagų [94]. Tinkamai bandinių ženklimui pasirinkti dažai daro įtaką jų kokybei bei gaunamų rezultatų patikimumui [95]. Galima išskirti kelias pagrindines dažų grupes, tai: plastizoliniai dažai bei vandeniniai dažai. Plastizolinių dažų sudėtyje yra sintetinio polimero dispersijos plastifikatoriaus, vandeninių dažų pagrindas yra akriliniai vandenyje tirpūs polimerai [96].





**1.12 pav.** Bandinių ženklėjimas skrituliukų tinkleliu: a – chaotiškos struktūros skirtingų dydžių skrituliukų tinklelis [82]; b, d – reguliarios struktūros skrituliukų tinklelis [9, 92]; c – nepertraukiamų skrituliukų tinklelis, e – skirtingo dydžio skrituliukų tinklelis [93]

Liaunų bandinių ženklėjimui naudojamas purškimas, spausdinimas, piešimas ranka. Purškimas ant bandinių gali būti atliekamas keliais būdais: 1 – purškama šalia, o ant bandinio patenka nuo purškiamo paviršiaus atšokę lašeliai; 2 – naudojamas aukšto spaudimo specialus purkštukas [97]. Spausdinimui naudojamos kelios technologijos – šilkografija, transferos (perkeliamoji šilkografija), sublimacija, tiesioginis skaitmeninis spausdinimas. Ženklėjimas ranka dažniausiai naudojamas nedidelių bandinio vietų ženklėjimui [70-72], nes galimi netikslumai.

#### **1.4 Liaunų medžiagų vizualinis paviršiaus defektų (pažeidimų) vertinimas vaizdų analizės metodais**

##### **1.4.1 Tekstilinių medžiagų paviršiaus tyrimai**

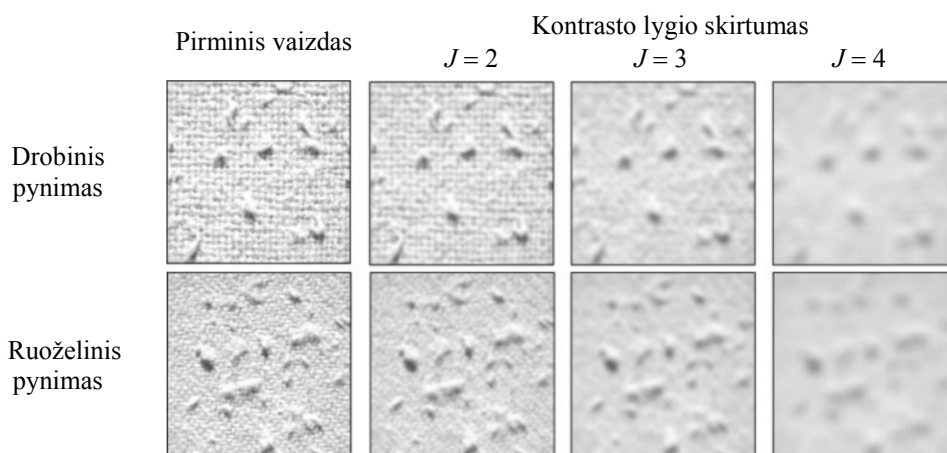
Įvairios tekstilės medžiagų paviršiaus problemos tiriamos taikant vizualinį objekto vertinimą vaizdų analizės metodai pritaikomi tekstilės medžiagų spalvos rodiklio nustatymui [33], audinio spalvos pokyčių įvertinimui [93, 98], medžiagos paviršiaus raukšlėtumo, glamžumo, pumpuravimosi, šiurkštumo, blizgesio ir kt. charakteristikų nustatymui [39, 99-100]. Tekstilės objektai sudaryti iš labai smulkių detalių, todėl kokybiškam vaizdo atpažinimui reikalingos vaizdo pagerinimo operacijos, taip išvengiama struktūrinių defektų bei pašalinių triukšmų [26, 101].

Lietuvių tyrėjai G. Karazija jau 1998 m. straipsnyje [64] nagrinėjo metodą, pagrįstą vaizdų analize, skirtą verpalų dengiamajai gebai įvertinti. Verpalų dengiamoji geba išreiškiama procentais arba ploto vienetais, paskaičiuojama iš binarinio ir pilkosios skalės vaizdo pagal verpalų užimamą plotą. Gauti rezultatai parodė, kad vaizdų analizės metodu galima nustatyti tik tų audinių paviršiaus užpildymą, kurių siūlai išlaiko savo formą. Šis metodas netinkamas audiniams, kurie yra išausti iš kompleksinių, artimo nuliui sukrumo siūlų.

Megztinės medžiagos struktūros vertinimas atliekamas [102] pasitelkus standartines kompiuterines programas, vaizde paskaičiuojamas vidutinis kilpų žingsnis ir kilpų eilučių aukštis. Tiriant margintus bandinius, susidurta su rezultatų patikimumo problema, todėl metodas labiau tinkamas vienspalvėms medžiagoms. Austinių medžiagų tankumo įvertinimas atliekamas panaudojus furjė transformacijos filtrą, taip pagerinamas bandinio pynimo bei tankumo atpažinimas, [58]. Spalvotų medžiagų pynimo rašto nustatymas ir toliau išlieka problemine tyrimų sritimi. Pan R. ir kt. atliko melanžinių bandinių rašto bei tankumo nustatymo

tyrimą [103]. Pritaikius vaizdų koreliacijos metodą bei pilkosios skalės bangelių transformaciją, audinio tankumas buvo įvertintas sėkmingai, tačiau metodas netinkamas visoms spalvotoms medžiagoms.

Vaizdų analizės būdu vertindami audinių akytumą tyrėjai nustatė, kad egzistuoja tiesinė priklausomybė nuo šviesos spindulių praeinamumo per audinį ir oro pralaidumo rodiklių [104]. Neaustinių medžiagų pluoštelių pasiskirstymo tolygumas vertinamas pagal CV indeksą. Keičiantis bandinio paviršiniam tankiui keičiasi ir CV indekso vertės. Kuo paviršinis tankis didesnis, tuo ir CV indekso vertė didesnė [105].



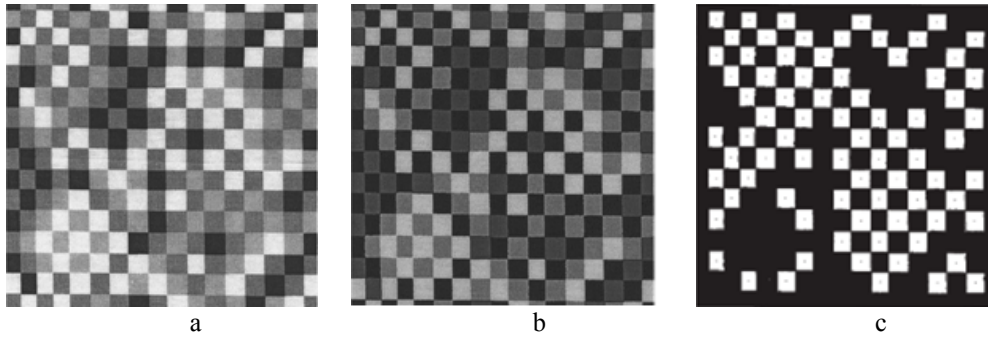
**1.13 pav.** Medžiagų pumpuravimosi vertinimas taikant vaizdų analizės metodą [105]

Atsparumas nusidėvėjimui vertinamas pagal kontrasto skirtumą tarp kontrolinės medžiagos ir medžiagos po pumpuravimosi (1.13 pav.), nustatomas pumpurėlių išsibarstymo dydis, forma, orientacijos kampas. Šio metodo trūkumas – jis pritaikomas tik vienspalvėms medžiagoms.

Kaip matyti, gali būti nagrinėjamos įvairios tekstilės medžiagų paviršiaus problemos, vaizdai tiriami pasitelkiant binarinius, pilkosios skalės vaizdus, skaičiuojamas  $CV$  indeksas, spalvos kontrasto skirtumas bei pilkosios skalės bangelių transformacija. Visais vaizdų analizavimo atvejais naudojamos vaizdo pagerinimo operacijos, nes tekstilės medžiagų paviršiai dėl specifinių charakteristikų (šviesos atspindėjimo, akytumo, pūkuotumo ir t.t.) turi būti vertinami optinių triukšmų fone.

#### 1.4.2 Vizualinis spalvos vertinimas

Moksliniuose darbuose nagrinėjama skalbimo, balinimo, blukinimo ir kt. įtaka medžiagos spalvai ir kitoms savybėms. Straipsnyje [33] audinio spalvos pasikeitimas po apdailos lazeriu tiriamas Image J programa. Tam, kad būtų matomas spalvų pasiskirstymas pustomių skalėje bei jų kiekis bandinyje, iš histogramos surandama spalvos vidutinė vertė  $C$  (Mean). Tyrimo metu nustatyta, kad tarp lazerio galios ( $P$ ) ir spalvos ( $C_{vid}$ ) yra stipri tiesinė priklausomybė.



**1.14 pav.** a – Skenuotas bandinio vaizdas, b – filtruotas bandinio vaizdas, c – išskirtas vienos spalvos vaizdas [106]

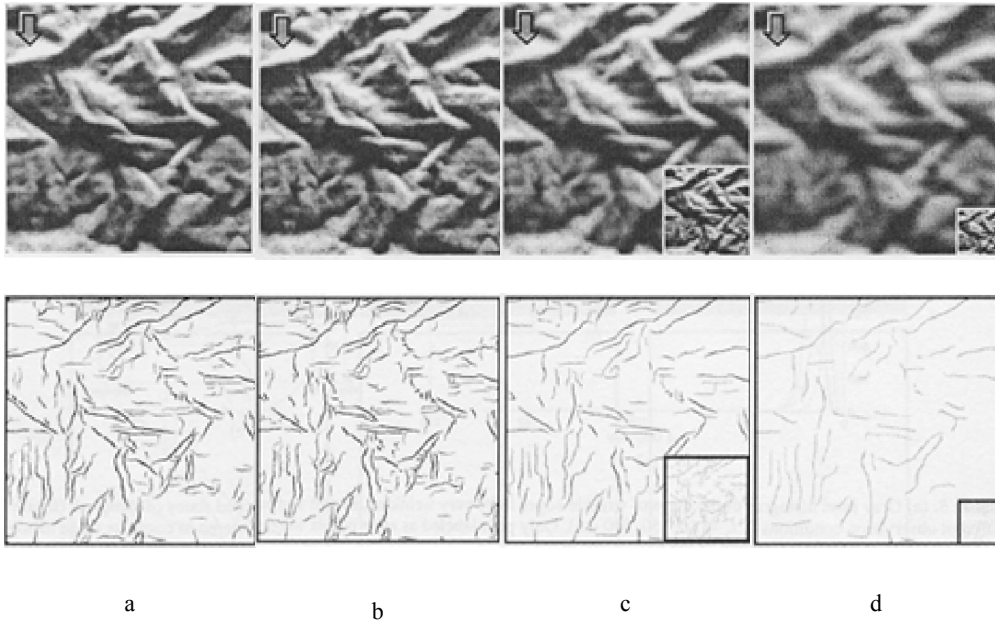
Margintų audinių spalvos rodiklių vertinimas vaizdų analizės metodu atliekamas suskirstant audinius į grupes pagal spalvą [106]. Spalvų grupių reikšmių filtravimas atliekamas pagal *SC* (specifinį negrįžtamos grupės) kriterijų, gautoms spalvų reikšmėms pritaikomas grupių algoritmas ir apskaičiuojamas marginto audinio spalvinio modelio rodiklis (1.14 pav.). Galime pastebėti, kad kontrastuojančios spalvos geriau išskiriamos iš aplinkos nei tos, kurios pasižymi mažu kontrastu.

### 1.4.3 Tekstilinių medžiagų paviršiaus glamžumo vertinimas

Dažną kartą tekstilės medžiagų raukšlėtumo vertinimas yra subjektyvus, šių tyrimų problema, jog yra sudėtinga išpildyti eksperimentų atsisikartojamumo sąlygas, pasitelkus vaizdų analizavimo metodus, siekiama surasti objektyvius raukšlėtumo vertinimo rodiklius.

Lininių audinių traukumo ir glamžumo tyrimas atliekamas, pagal pilkosios skalės pasiskirstymo histogramas. Nustatyta, kad pilkosios skalės standartinis nuokrypis charakterizuoja medžiagos glamžumą, t.y. kuo glamžumas didesnis, tuo plačiau pasiskirsto pilkosios skalės vertės [107].

Kito [108] straipsnio autoriai teigia, kad pilkosios skalės rodiklis ne visada gali būti patikimas ir pakankamas rodmuo norint nustatyti skirtingų rūšių raukšlėtumą, autoriai pabrėžia, kad medžiagos raukšlėtumas turi būti analizuojamas kompleksiskai, įvertinant kelis rodiklius, tokius kaip raukšlių tankumas, aštrumas, bandinio profilio linija bei apskaičiuotas *CV* indeksas. Pagal gautus rodiklius raukšlėtumas įvertinamas balais nuo 1 iki 5. Mitsuo et al. taip pat rekomenduoja [65] kompleksiskai įvertinti medžiagos raukšlėtumą, jis siūlo paviršiaus raukšlėtumą papildomai įvertinti *x* ir *y* ašyse, išanalizuojant profilio linijas bei histogramas, tuomet sudaryti pilkumo lygių diagramą, kur pagal amplitudės smailių aukštį ir dažnumą įvertinamas raukšlėtumo laipsnis. Autoriai pabrėžia, kad vaizdų fiksavimo metu labai svarbios pradinės eksperimento sąlygos bei tinkamas apšvietimo kampo parinkimas, apšvietimo kampui, nukreiptam į bandinio plokštumą mažesniu nei  $50^\circ$  kampu, sunku užfiksuoti skirtumą tarp 4 ir 5 raukšlėtumo lygių, o apšvietimo kampą į bandinio plokštumą nukreipus daugiau kaip  $70^\circ$ , visi raukšlėtumo lygiai nustatomi nesunkiai.



**1.15 pav.** Tekstilinės medžiagos raukšlėtumo vertinimas, kai keičiamas fotografavimo atstumas: a – pirminis vaizdas; b – 50 cm; c – 150 cm; 300 – cm [18]

Straipsnyje [18] apžvelgta, kokią įtaką tekstilės medžiagos raukšlėtumo tyrimams turi fotografavimo atstumas. Nustatyta, kad medžiagos raukšlėtumas geriau įvertinamas fotografuojant iš mažesnio nei 50 cm atstumo (1.15 pav.).

Siūloma medžiagos raukšlių nustatymui pritaikyti Matlab programinį paketą, čia vaizdų apdorojimo stadijoje pirminis vaizdas konvertuojamas į pilkosios skalės vaizdą, tuomet panaudojama kraštų aptikimo funkcija ir iš baltos bei juodos spalvų santykio sprendžiama apie raukšlėtumo lygį [109]. Gauti rezultatai palyginti su jau žinomu kompleksiniu raukšlių vertinimo metodu, pastarieji 86,67 % sutapo.

#### **1.4.4 Austos struktūros medžiagų paviršiaus nelygumo ir dėvėjimosi dėl trinties vertinimo metodikos, kriterijai, įtakos turintys veiksniai**

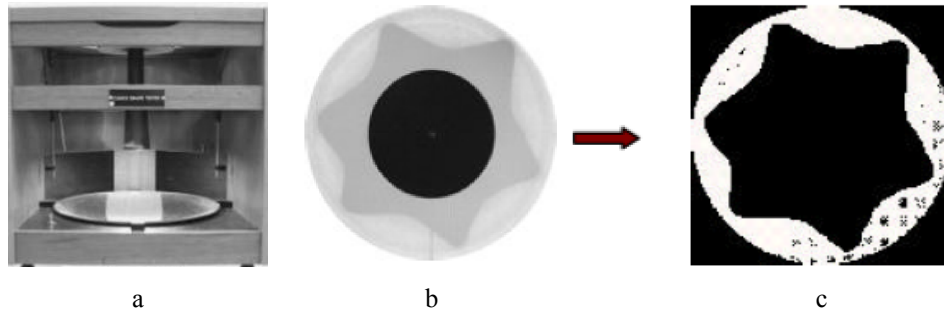
Apsauginės tekstilės medžiagos patiria laipsnišką išorinių veiksnių poveikį, dėl kurio prasideda medžiagos irimas bei apsauginių savybių blogėjimas.

Medžiagų trinties savybė vertinama optiniu nekontaktiniu būdu, naudojant optinius pluoštus ir šviesos jutiklius [110]. Krintanti iš šviesos optinių pluoštų šviesa nušviečia bandinio paviršių, atspindėję spinduliai užfiksuojami foto-diodo. Foto-diodas šviesos atspindį paverčia įtampa, kuri praėjusi pro stiprintuvą ir filtrą užfiksuojama skaitmeniniu matuokliu ir atvaizduojama grafine forma. Priklausomai nuo paviršiaus nelygumo kinta atspindėtos šviesos intensyvumas.

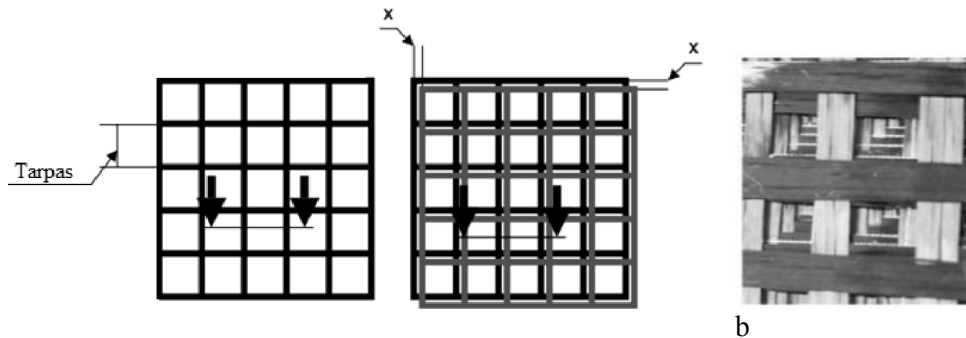
## 1.5. Liaunų medžiagų deformacijų vertinimas vaizdų analizės metodais

### 1.5.1 Liaunų medžiagų geometriniai deformavimosi charakteristikų matavimai vaizdų analizės metodais

Viena iš deformavimosi charakteristikų yra kritumas – tai estetinė tekstilės medžiagų savybė, nusakanti, kaip veikiamas savojo svorio krinta, išsilanksto į klostes iš dalies įtvirtintas tam tikrų matmenų bandinys. Kritumas įvertinamas pagal susibangavusio bandinio kritumo parametrus (kritumo koeficientą), kritumo koeficientas gali būti nustatomas ir vaizdų analizės metodu [57]. Tokio eksperimento metu greičiau atliekami matavimai, tačiau dėl netinkamo apšvietimo parinkimo ir mažo kontrasto gali susidaryti pašaliniai triukšmai (1.16 pav. c), dėl kurių atsiranda netikslumai nustatant bandinio kontūrus.



1.16 pav. Kritumo tyrimo metu naudojamas kritumo matuoklis su lygiagrečių spindulių apšvietimu: a – kritumo matuoklis; b – fotografuotas dvispalvis vaizdas; c – binarinis bandinio vaizdas [56]



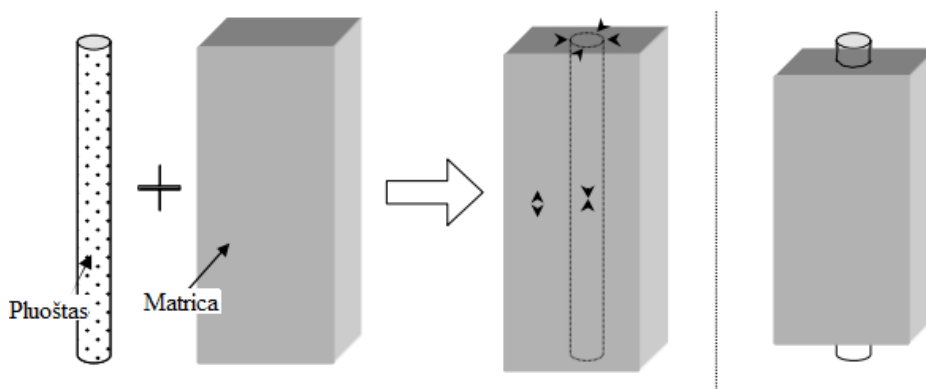
1.17 pav. a – deformacijų vertinimas tinklelio metodu, b – tiriamo bandinio fragmentas [111]

Vaizdų geometrinėms transformacijoms analizuoti pritaikomas tinklelio metodas, nustatantis kompozitinių medžiagų šlytį [111], matuojamas kelių tinklelių prasislinkimas vienas kito atžvilgiu apibrėžtu poslinkiu  $x$  (1.17 pav., a). Ši šlyties charakteristika nustatoma iš skaitmeninių vaizdų (1.17 pav., b). Eksperimento metu tirama centrinė nuotraukos dalis, dėl tiriamų bandinių specifikos nereikalingas bandinių ženklėjimas.

### 1.5.2 Vaizdų analizės technikų pritaikymas matmenų stabilumo tyrimuose

Šiuo metu itin suintensyvėjo tyrimai, kuriuose vaizdų analizė naudojama ne tik norint užfiksuoti defekto susidarymą ir toliau sekti jo kitimą, bet ir stebint tekstilės medžiagos atsaką į įvairius taikomus poveikius (pvz., apkrovą, drėgmę, temperatūrą ir pan.) [112]. Pagrindinis tokių metodų tikslas – tai viso *kintamųjų lauko* (angl. full field) matavimas, kai įprastai naudojamų tyrimo metodų pateikiamų vidutinių arba apibendrinančių (pvz., tik galutinė vertė) duomenų nepakanka [113]. Medžiagos elgsenos stebėjimas realiu laiku leidžia ne tik nustatyti defektų priežastis, bet ir prognozuoti ar užkirsti kelią jų susidarymui.

Išskirtinis tekstilės medžiagų gebėjimas pakeisti savo formą svarbus ne tik aprangoje, bet ir techninės paskirties gaminiuose, tokiuose kaip nuolatinės ir laikinos, t.y. surenkamos, statybinės konstrukcijos (tentai, palapinės, interjero dekoracijos) [114] ar tekstile armuoti kompozitai [115-116], kur natūralių pluoštų svarba taip pat sparčiai didėja. Gamybos metu tekstilė yra deformuojama, o gaminiui suteikus reikiamą erdvinę formą ji užfiksuojama. Audinius tempiant tarpusavyje perpintos metmenų ir ataudų siūlų sistemos sąveikauja ir lemia netiesinį medžiagos atsaką į ją veikiančias jėgas; metmenų ir ataudų siūlų sistemas veikiantys įtempiai yra skirtingi, todėl gaunamos net tik skirtingos deformacijos metmenų ir ataudų kryptimis, bet ir netolygus jų pasiskirstymas bandinyje [113; 114; 117-120]. Svarbu atkreipti dėmesį, kad netolygus įtempių ir deformacijų pasiskirstymas (tiek tarp metmenų ir ataudų siūlų sistemų, tiek ir visame bandinyje) lemia koncentracijos reiškinius. Gerai žinoma, kad įtempių ir deformacijų koncentracijos zonose prasideda pirmalaikis medžiagos irimas [120]. Todėl vaizdų analizavimas pasitarnauja tiriant medžiagų savybes, nustatant minimalias ir maksimalias deformacijų vietas. Šių problemų sprendimui naudojami viso deformacijų lauko matavimo metodai svarbūs parenkant tinkamą audinio struktūrą [121]. Tačiau svarbu ne tik įvertinti audinio deformacijas formavimo metu, bet ir kaip jos kinta vartojimo metu.



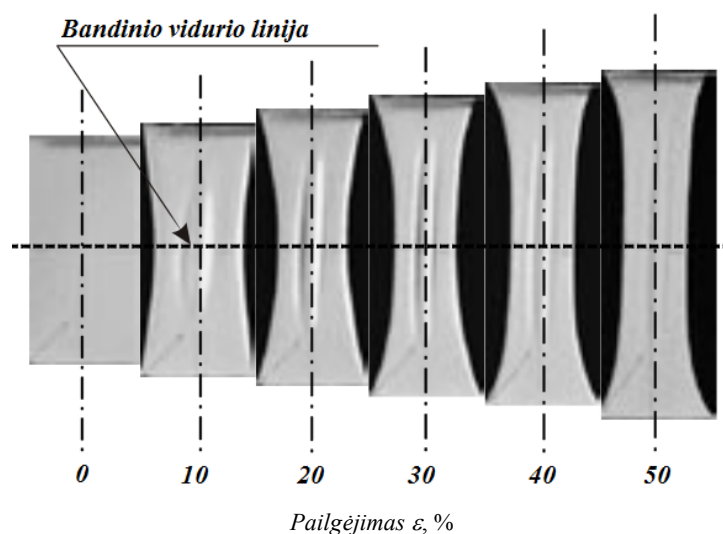
1.18 pav. Įtempių susidarymas tekstilės kompozite [122]

Dar visai neseniai jos buvo tiriamos pasitelkiant analitinius ir baigtinių elementų metodus, kadangi stigo įrangos, leidžiančios nustatyti deformacijas pluoštų ir

polimerinės matricos tarpfazėje arba tarp daugiasluoksnės struktūros sluoksnių (1.18 pav.) [123-124]. Šie klausimai dar svarbesni tiriant su pradiniu įtempimu įtemptų kompozitų elgseną [116, 122]. Pasitelkus vaizdų analizavimo metodikas, gali būti palengvinamas deformavimosi procesų analizavimas, tačiau pasigendama vaizdų analizės metodikų, skirtų viso kintamųjų lauko deformacijų lauko matavimams.

### 1.5.3 Vaizdų analizės metodai tempimo testuose

Kritinės tekstilės deformavimo sąlygas nusakantis klupdymo reiškinys sunkiai analizuojamas tradiciniais metodais, todėl eilėje darbų buvo pasiūlyta pritaikyti vaizdų analizės metodą [9, 125-130], padedantį nustatyti pradines klupdymo charakteristikas pagal pilkumo zonų pasikeitimą (1.19 pav.). Uždara pilkumo lygio zona bandinio centre identifikuoja, kaip klupimo raukšlė analizuojamame vaizde sumažinus spalvų skaičius. Kiti autoriai siūlo neapsiriboti tik klupimo raukšlės indentifikavimu, o išmatuoti jos ilgį, plotį, raukšlių skaičių bei analizuoti klupdymo raukšlės gylio pokyčius [9].



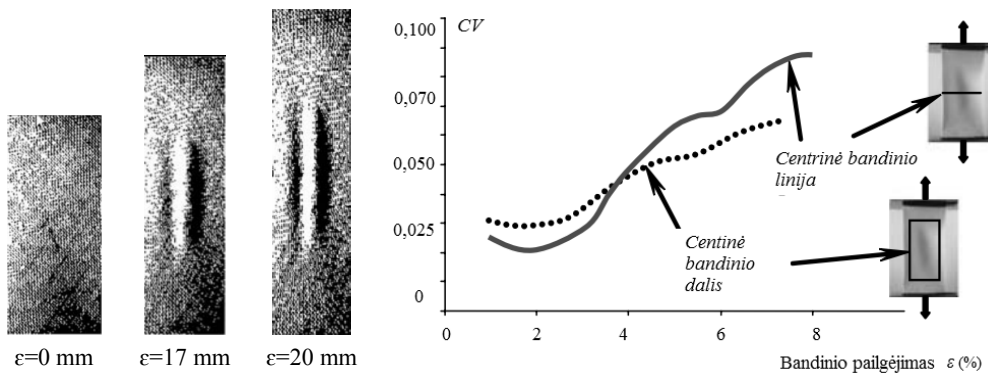
**1.19 pav.** Tempiamo įstrižo bandinio vaizdų analizė, leidžianti užfiksuoti kritinį bandinio klupdymo momentą [128]

Analizuojant klupdymo metu susidariusią raukšlę, ieškomas ryšys tarp pilkumo skalės intensyvumo ir audinio paviršiuje susidariusios raukšlės (1.20 pav.) [131]. Klupdymo pradžia bei kritinės klupdymo sąlygos nusakomos iš binarinio deformuojamo bandinio vaizdo. Pilkos skalės intensyvumo išsibarstymas išreiškiamas per variacijos koeficientą  $CV$ :

$$CV = S/I_{vid} \quad (1.1)$$

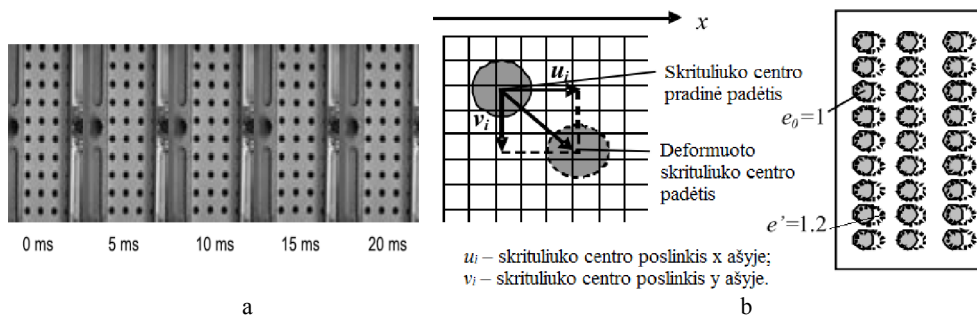
čia:  $S$  – standartinis pilkosios skalės intensyvumo nukrypimas,  $I_{vid}$  – vidutinė pilkumo skalės reikšmė.

Klupdymo reiškinius vaizdų analizės metodu nagrinėję autoriai [4, 9, 128-131] pabrėžia, kad tyrimo eigai įtakos turi apšvietimo, kontrasto bei filtravimo režimų parinkimas.



**1.20 pav.** Vaizdų analizės būdų užfiksuotas klupdymo raukšlės susidarymas [131]

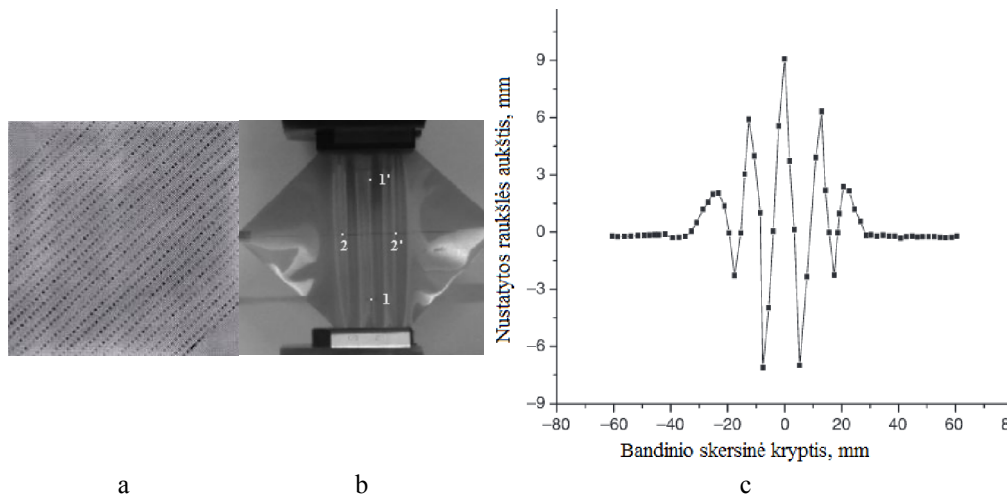
Mažas tempiamų bandinių deformacijas tyrė Xin B. ir Hu J. [9] pasiūlė ant bandinių užnešti taisyklingų apskritimų tinklą ir plokščiojo tempimo metu nustatytais laiko momentais užfiksuoti deformuojamo bandinio vaizdus (1.21 pav.). Pritaikius vaizdų apdorojimo operacijas, iš vaizdo išskirtas tinklėlis ir analizuojant skrituliukų formą bei vietą sprendžiama apie išilgines ir skersines deformacijas bandinyje (1.21 pav., b).



**1.21 pav.** Dinaminis deformuojamo bandinio analizavimas: a – vaizdų grupė, užfiksuota bandinio tempimo metu, b – poslinkio ir formos deformacijos matavimai [9]

Erdvinių raukšlių susidarymo problemą tyrė C. Wang ir kt. tyrėjai (1.22 pav.) [80]. Eksperimento metu tiriamos labai plonos membranos, mokslininkai pabrėžia, kad tyrimuose dėl plėvelių liaunumo, kontaktiniai tyrimo metodai netinkami. Vaizdų analizės metodas pasirinktas kaip tinkamiausias deformacijų analizavimo būdas, čia eksperimento metu iš šešių skirtingų fotografavimo taškų užfiksuojamos susidariusios raukšlės, jų skaičius bei dydis. Erdvinės deformacijos analizuojamos sudėjus vaizdus. Buvo naudojama speciali tyrimo ir programinės įranga, reikalingi dideli kompiuteriniai resursai, kruopštus kalibravimo procesas, tačiau straipsnyje pasigendama kalibravimo proceso įvertinimo.

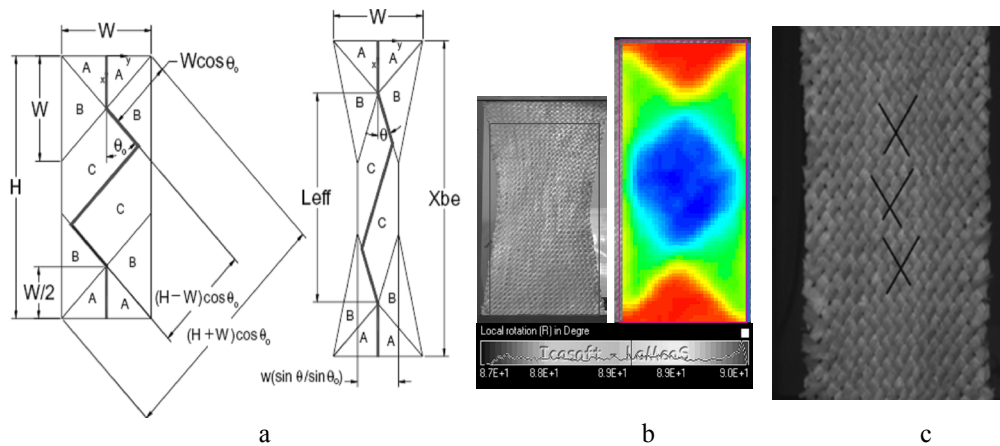




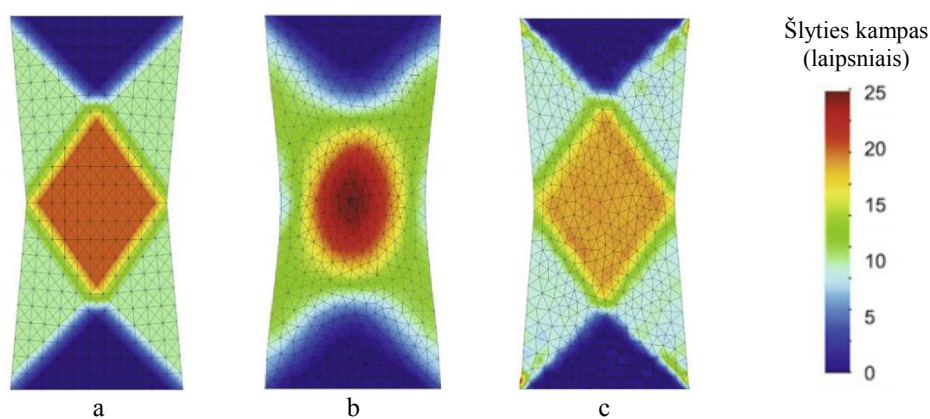
**1.22 pav.** a – bandinio ženklėjimas taškelių tinkleliu, b – skaitmeninis bandinio vaizdas, c – vaizdų analizės būdu gauto skaitmeninio vaizdo skersinis pjūvis

Tekstilės medžiagų elgseną tyrėjai analizuoja pagal šlyties kampo kitimą [25, 132]. *Kiti autoriai* šlyties kampą siūlo įvertinti trimis būdais: pirma – atlikti teorinį šlyties kampo įvertinimą, antra – pritaikius vaizdų analizės metodą, šlyties kampo kitimas nustatyti specialia programine įranga (1.23 pav., b), trečia – šlyties kampą išmatuoti tiesiogiai iš fiksuojamų deformuojamos tekstilės nuotraukų (1.23 pav., c) [25]. Sulyginus trimis skirtingais būdais nustatytus šlyties kampo rezultatus, pastebėta, jog visais metodais jie buvo gauti panašūs. Pastebima, o šlyties kampų matavimas nuotraukose atliekamas rankiniu būdu, todėl matavimo procesas trunka sąlyginai ilgai.

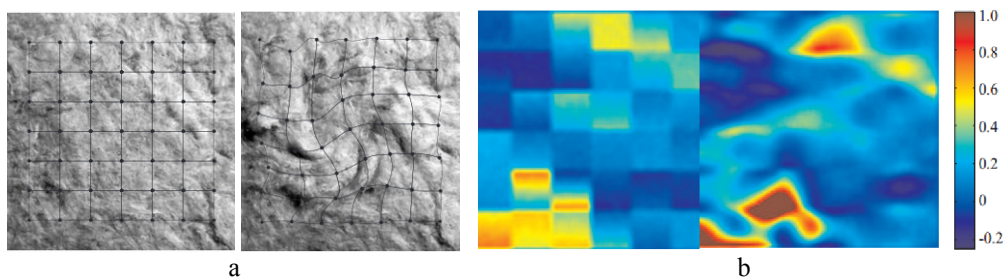
Išsamiai tiriamojo objekto analizei dažnai atliekamas deformacijų modeliavimas, kurio metu siekiama atvaizduoti tempiamo audinio tris skirtingas deformavimosi zonas. Pirmojoje zonoje dėl audinio siūlų įtvirtinimo spaustuvuose bandinys beveik nesideformuoja, antrojoje vyksta dalinis siūlų sukimasis ir slydimas, trečioje zonoje dėl grynosios šlyties atsiranda didžiausios deformacijos [99]. Ieškant tinkamiausio deformacijas imituojančio būdo [133], nustatyta, kad taisyklingi trikampiai elementai leidžia išskirti bandinio skirtingo deformavimo regionus, atspindi idealizuotą tempiamos tekstilės medžiagos elgseną (1.24 pav., a), tačiau tokie elementai netinkami modeliuojant erdvines bandinio deformacijas, todėl autoriai panaudojo netaisyklingų trikampių tinklą, ir tik įvedus papildomas matematinio skaičiavimo operacijas, atspindėtos deformacijos priartėjo prie idealizuotos deformacinės liaunų medžiagų elgsenos (1.24 pav., c). Tačiau idealizuotas deformacinis procesas tik iš dalies leidžia priartėti prie realių liaunų medžiagų deformavimosi pobūdžio įvertinimo, realybėje liaunų medžiagų deformacijos yra daug sudėtingesnės.



**1.23 pav.** Šlyties kampo įvertinimas: a – teorinis skaičiavimas, b – vaizdų analizės metodas, c – rankinis matavimas [25];  $W$  – bandinio plotis;  $H$  – bandinio aukštis;  $\theta_0$  – Pradinis šlyties kampas;  $\theta$  – šlyties kampas po deformacijos;  $L_{\text{eff}}$  – bandinio pailgėjimas po deformacijos;  $A; B; C$  – bandinio zonos besiskiriančios deformavimosi pobūdžiu



**1.24 pav.** Vaizdo segmentavimas į diskrečius objektus; a – taisyklingų trikampių pagalba; b – netaisyklingu trikampių pagalba; c – netaisyklingu trikampiu pritaikius papildomas matematinės operacijas [133]



**1.25 pav.** Koreliacinės vaizdų analizės pritaikymas tekstilės pluoštų tyrimuose: a – bandinio vaizdas; b – lokalių deformacijų vaizdas

Skaitmeninio vaizdo koreliacijos procesą nulemia vaizdo pasisukimas bei jo iškraipymas. Koreliacijos mechanizmas pagrįstas pilkumo reikšmių skalės stebėjimu. Nustatant tiriamo objekto kontūrus, gali būti atliekami deformuojamo objekto matavimai bet kokiame paviršiaus taške (1.25 pav. a) (1.25 pav. b,c). Vaizdų koreliacinei analizei atlikti sukurtos tiek atvirojo kodo (Opticist), tiek komercinės (Matlab, Icasoft, Aramis, VIC – 2, VIC – 3, LAVision, Strain Master ir kt.) programos. Moksliniuose straipsniuose [9, 25, 31] autoriai naudoja skaitmeninės koreliacijos metodus, analizuojant plokštuminę medžiagos elgseną vienašio įstrižo tempimo [25], dviašio deformavimo [31, 60] ir tempimo šlyties rėmelyje [31, 61] metu.

Atliekant tyrimus vaizdų analizės metodais nustatyta, kad optiniai matavimai yra patikimi siekiant įvertinti medžiagų deformacijas. Pastebima, jog vaizdų apdorojimo metu susiduriama su panašiomis problemomis, tai: tiriamo objekto kontūro iš aplinkos išskyrimas, apšvietimo įtaka, fotografavimo atstumo įtaka bei gaunamų rezultatų patikimumo įvertinimas.

### **1.6 Vaizdų analizės metodų patikimumo, paklaidų vertinimo apžvalga**

Matavimo rezultato apibūdinimas yra pilnas tik tuo atveju, kai jis nurodo matuojamojo reikšmę ir matavimo neapibrėžtį, būdingą šiam matavimui. Matavimų neapibrėžtis susijusi su matavimo rezultatų parametrais, kurie charakterizuojami reikšmių, gautų matavimo procese. Bendru atveju matavimų neapibrėžtis sudaryta iš daugelio komponentų, kurios gaunamos iš matavimų statistikos, o taip pat kitų šaltinių, charakterizuojančių konkretų matavimą [134]. Plėtojant vaizdų analizavimo metodikas svarbu atkreipti pakankamą dėmesį į vaizdų apdorojimo algoritmą bei gaunamų rezultatų patikimumo lygmenį. Būtina įvertinti matavimo neapibrėžtį bei matavimo metodo metrologines charakteristikas.

Specifiniai skaitmeninių vaizdų apdorojimo ir analizės metodai, skirti tekstilės savybių tyrimui ir vertinimui, nagrinėjami straipsniuose [135-137]. Pastebima, kad autoriai dažnai per mažai dėmesio skiria metodo patikimumo klausimams. Darbuose pasigendama metrologinių charakteristikų patikimumo įvertinimo, kurios svarbios siekiant užtikrinti matavimų vienovę, įvertinant pačių matavimų patikimumą bei atliekant matavimo priemonių įvertinimą. Norint įvertinti rezultato patikimumą, būtina turėti kalibravimo bei neapibrėžčių skaičiavimo metodikas [134].

Atliekant išskirto optinio kontūro matavimus, dėl įvairių priežasčių gali atsirasti tam tikros paklaidos, kurios turi būti išanalizuotos bei nustatytos pagrindinės jų atsiradimo priežastys [25, 30, 138]. Paklaidų atsiradimo priežastys buvo išanalizuotos vaizdų analizės būdu matuojant dygsnio ilgį siūlėje [139]. Nustatyta, kad netikslumai matavimuose atsiranda dėl vaizdo kameros skiriamosios gebos, kameros pasvirimo kampo, siūlo storio, vaizdo matmenų matavimo, vaizdo kameros objektyvo optinių iškraipymų, medžiagos susiraukšlėjimo. Dygsnio ilgio matavimo tikslumui įvertinti eksperimento metu buvo naudojama kalibruota liniuotė (fotografuojama kartu su siuviniu). Pabrėžiant matavimo įrangos kalibravimo būtinybę, autoriai atliko vidinių ir išorinių parametrų kalibravimą.

## 1.7 Literatūros apžvalgos apibendrinimas

Šiuo metu sparčiai populiarėja paprasti ir nebrangūs prietaisai bei metodai medžiagų savybių tyrimams, tokiu būdu papildomi tradiciniai metodai, o kai kuriais atvejais pakeičiami naujais kompiuteriais valdomais ir lengvai apdorojamais metodais. Technologijos, susijusios su objekto sekimu optinių prietaisų pagalba ir jo vaizdo atkūrimu, pastaruoju metu itin plačiai naudojamos bei tobulinamos. Viena iš aktyviai tobulinamų sričių – vaizdų analizės metodų taikymas bekontakčiam medžiagų deformacijų vertinimui. Vaizdų analizės metodai gali būti taikomi metalų, plėvelių, austų, megztų, neaustinių bei kitų medžiagų savybių vertinimui.

Optikos principais pagrįstos šiuolaikinės sistemos leidžia ne tik kokybiškai užfiksuoti ir atkurti tiriamo objekto vaizdą skaitmeninėje formoje, bet ir jį išanalizuoti.

Atlikus literatūros apžvalgą galima išskirti dvi pagrindines vaizdų analizavimo tyrimų sritis: medžiagų statinių ir dinaminių savybių vertinimas. Medžiagos elgsena tirama naudojant skaitmeninius vaizdų analizės, pilkosios skalės, bangelių transformacijos bei kitomis vaizdų analizavimo technikomis, *moiré* linijų metodo, speklų interferometrijos ir holografijos metodais.

Nepaisant žinomų ir praktiškai taikomų skirtingų standartizuotų ir unikalių tekstilės medžiagų deformacinių savybių tyrimo metodų bei daugybės žinomų skirtingų vaizdų analizės technikų, nėra vienos bendrosios vaizdų analizės metodikos, kiekvienai problemai spręsti reikia individualaus priėjimo. Tam pasitarnauja didelis vaizdų analizės metodų lankstumas. Vertinant ir prognozuojant tekstilės medžiagų elgseną atliekama eilė tyrimų. Didelis dėmesys skiriamas bandinių paruošimui, metodikoms bei veiksnių, turinčių įtaką gaunamų rezultatų patikimumo nustatymui.

Literatūros šaltinių analizė rodo, kad siekiant įvertinti tekstilės medžiagų deformacinę elgseną atliekama nemažai tyrimų bei sukurta eilė metodikų, tačiau daugelis jų yra brangios ir reikalauja sudėtingos programinės bei kompiuterinės įrangos. Todėl iš literatūros apžvalgos išplaukė aktualus darbo tikslas – sudaryti nesudėtingą bei patikimą, vaizdų analizės pagrindu sudarytą, deformacinės elgsenos vertinimo metodiką bei išnagrinėti galimybes metodą taikyti, lanksčių tekstilės medžiagų deformacijų analizėje bei paviršiaus nelygumo tyrimuose.

Siekiant darbo tikslo sprendžiami šie uždaviniai:

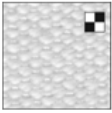
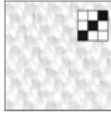
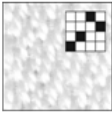
- Pasitelkiant vaizdų analizę iširti ir įvertinti deformuojamų tekstilės medžiagų deformavimosi pobūdį visame deformaciniame lauke.
- Vaizdų analizės pagrindu sudaryti vienašiu tempimu deformuojamų austos struktūros medžiagų elgsenos vertinimo metodiką, parinkti bandinių ženklavimo būdą, eksperimentines sąlygas bei patikimus rodiklius, leidžiančius įvertinti susidariusias deformacijas.
- Pateikiant matavimų neapibrėžties rodiklius įvertinti sudaryto vaizdų analizės metodo patikimumą.
- Sudarytą metodiką pritaikyti kompozitų deformacinės medžiagų elgsenos tyrimuose bei paviršiaus nusidėvėjimo įvertinimui.

## 2. TYRIMŲ METODOLOGIJOS SUDARYMAS

### 2.1. Tyrimo objektai

Vienašiu tempimu deformuojamų liaunų medžiagų savybių tyrimui bei metodo patikimumo įvertinimui vaizdų analizės metodu, sudaryti pasirinktos tekstilės medžiagos, kurių pradinės charakteristikos bei struktūra parinkta atsižvelgiant į tyrimų tikslą. Kompiuterinėmis žakardinio audimo staklėmis *Lindauer DORNIER GmbH* išausti trys skirtingo pynimo, tos pačios žaliavos siūlų ir vienodo tankumo audiniai. Tirtų audinių pagrindinės charakteristikos pateiktos 2.1 lentelėje.

**2.1 lentelė.** Pagrindinės tirtų audinių (grupė A) charakteristikos

Charakteristikos		Bandinio kodas		
		A1	A2	A3
Bandinio pavyzdys				
Pynimo tipas		Drobinis	Ruoželinis	4-nyčių satininis
Siūlų tankumo koeficientas*, cm <sup>-1</sup>	metmenų kr.	28		
	ataudų kr.	20		
Siūlų ilginis tankis, tex	metmenų kr.	39,9		
	ataudų kr.	18,1		
Pluoštinė sudėtis	metmenų kr.	70 % medvilnė; 30 % PES		
	ataudų kr.	100 % PES		

\* siūlų tankumas nustatytas remiantis standartu LST EN 1049-2: 1998 [139]

Siekiant ištirti ir palyginti skirtingo liaunumo medžiagų deformacinės savybės, A1, A2 ir A3 audiniai laminuojami „Poly-flex“ plėvele, plėvelės storis 105-125 mikronai (presavimo laikas 20 s, slėgis 48,3 kPa, temperatūra 165°C, NOVA 45 *Reliant Machinery*). Nelaminuotų audinių pagrindinės savybės pateikiamos 2.2 lentelėje.

**2.2 lentelė.** Parinktų audinių A1, A2 ir A3 pagrindinės savybės

Charakteristika	Audiniai		
	A1	A2	A3
Paviršinis tankis $w^*$ , g/m <sup>2</sup>	155	153	155
Storis $t^{**}$ , mm	0,43	0,47	0,54
Lenkiamasis standis $B^{***}$ , μNm	11,3	11,1	7,6

\* paviršinis tankis  $w$  įvertinamas pagal LST EN 12127:1999 standartą [140].

\*\* storis  $t$  nustatytas pagal LST EN ISO 5084:2000 standartą [141].

\*\*\* lenkiamasis standis  $B$  įvertintas F.T. Pirso gembinio lenkimo metodu [142].

Siekiant nustatyti vaizdų analizės metodo apribojimus bei bandinio jautrumą spalvai ir paviršiaus faktūrai, pasirinkti B 1÷7 grupės skirtingo pynimo audiniai, tarpusavyje besiskiriantys spalva, piešiniu ir tekstūra. Tirtų audinių pagrindinės charakteristikos pristatomos 2.3 lent., spalvinės charakteristikos pateiktos 2.4 lent.

**2.3 lentelė.** Pagrindinės tirtų audinių (grupė B) charakteristikos

Charakteristikos	Bandinio kodas							
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	
Bandinio pavyzdys								
Pynimo tipas	Ruoželis	Sudėtinis ruoželis	Atlasas	Drobinis	Drobinis	Sustiprintas ruoželis	Laužytas ruoželis (metmenų kr.) su elementariuoju ruoželiu (ataudų kr.)	
Paviršinis tankis $w$ , $\frac{g}{m^2}$	381	179	251	341	179	225	191	
Siūlų tankumo koeficientas $cm^{-1}$	metmenų kr.	34	83	136	24	19	34	26
	ataudų kr.	21	41	45	13	15	24	28

Bandinių spalvinės charakteristikos ištiriamos visapusiškai į pagalbą pasitelkiant du spalvos vertinimo rodiklius – spalvos nustatymas pagal *RGB* charakteristiką bei pagal *CV* indeksą. Spalvos charakteristikos pagal *RGB* išmatuojamos su spektrofotometru *X-Rite Color Digital Swatchbook*. Spalvos variacijos *CV* indeksas apskaičiuojamas iš skaitmeninio vaizdo histogramos:

$$CV = \frac{StdDev}{Mean} \quad (2.1)$$

čia: *StdDev* – standartinis spalvos nuokrypis, *Mean* – vidutinė spalvos reikšmė.









**2.4 lentelė.** Spalvinės tirtų audinių (grupė B) charakteristikos

Bandinio kodas	A1	B1	B2	B3	B4*	B5	B6	B7	
Audinio spalvinis efektas	Vienspalvis					Margintas	Margaraštis		
Spalvos charakteristika pagal <i>RGB</i> skalę	Red	255,0	255,0	255,0	254,0	248,0	221,2	170,8	127,4
	Green	255,0	255,0	255,0	248,0	239,0	121,3	164,8	127,8
	Blue	255,0	255,0	255,0	231,0	219,0	114,0	155,1	129,4
Spalvos charakteristika pagal <i>CV</i> indeksą	0,046	0,064	0,090	0,152	0,121	0,287	0,598	0,459	



\* B4 – čia metmenų ir ataudų siūlų sistemose buvo panaudoti artimo atspalvio siūlai.

Nustačius, metodo apribojimo sąlygas. Paviršiaus nelygumo tyrimui ir vertinimui, vaizdų analizės metodu, sudaryta skirtingos pluoštinės sudėties, sandaros ir mechaninių savybių vienspalvių audinių grupė C1 ÷ C8 (2.5 lent.). C audinių grupė skirta specialios paskirties funkcinės aprangos gamybai. Šią grupę galima suskirstyti į du pogrupius. Pirmąjį pogrupį C1 ÷ C3, sudaro vienasluoksniai I kategorijos apsauginės aprangos gamybai skirti audiniai, antrąjį dvisluoksniai audiniai C4 ÷ C7, dengti polimerinėmis dangomis, pagerinančiomis eksploatacines ir apsaugines medžiagos funkcijas.

**2.5 lentelė.** Pagrindinės tirtų audinių (grupė C) charakteristikos

Charakteristikos	Bandinio kodas								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	
Bandinio pavyzdys									
Pynimo tipas	Ruoželis	Ruoželis	Atlasinis	Drobinis	Drobinis	Drobinis	Drobinis	Drobinis	
Paviršinis tankis $w$ , $\text{g/m}^2$	164	253	290	95	210	140	245	182	
Siūlų tankumo koeficientas $\text{cm}^{-1}$	metmenų kr.	34	53	38	44	22	23	33	17
	ataudų kr.	21	28	23	30	20	23	15	17
Pluoštinė sudėtis	Medvilnė 50 % PES 50 %	Medvilnė 100 %	Medvilnė 50 % PES 50 %	PA 100 %	PES 100 %	PA 100 %	PES 100 %	PES 100 %	
Storis $t$ , mm	0,45	0,44	0,52	0,11	0,60	0,19	0,47	0,23	
Polimerinė danga	-	-	-	PU	PTFE	Silikonas	PU	PU	

**2.6 lentelė.** Pagrindinės tirtų audinių (grupė D) charakteristikos

Charakteristikos	Bandinio kodas	
	D1	D2
Bandinio pavyzdys		
Pynimo tipas	Drobinis	Drobinis
Paviršinis tankis $w$ , $\text{g/m}^2$	235	217
Siūlų tankumo koeficientas $\text{cm}^{-1}$	metmenų kr.	14
	ataudų kr.	17
Pluoštinė sudėtis	Linas 100 %	Linas 100 %
Storis $t$ , mm	0,84	0,43
Vardinis siūlų ilginis tankis, tex	metmenų kr.	86
	ataudų kr.	56
		105

Tekstilės medžiagų matmenų stabilumo tyrimui ir vertinimui vaizdų analizės metodu pasirinkta audinių grupė D (2.6 lent.). Šią grupę sudaro vienspalviai audiniai D1 ir D2, skirti naudoti tradicinėje namų interjero bei aprangos gamybos srityje, taip pat audiniai, dėl bioskaidumo pritaikomi plastikų kompozitų armavimui.

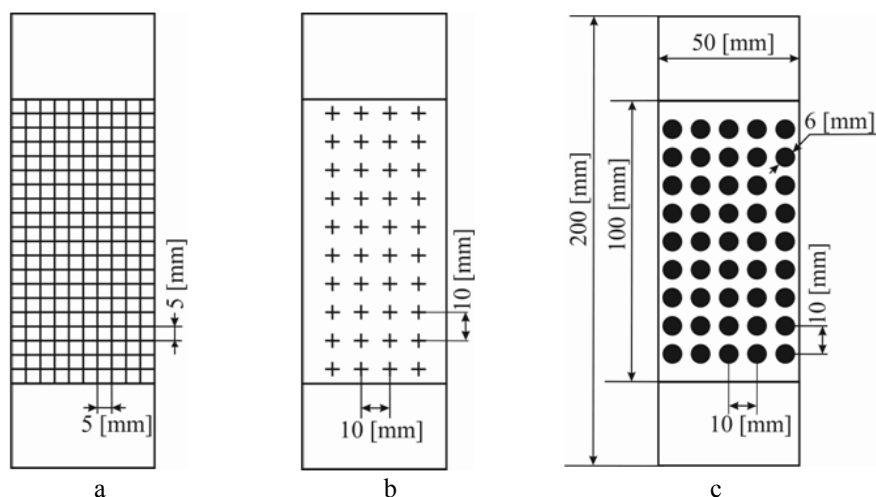
## 2.2. Vaizdų analizės metodas lokalių deformacijų vertinimui vienašio tempimo metu

Vienašio tempimo eksperimentai – tai metodiškai paprasti bandymai, taikomi norint įvertinti ne tik tekstilės medžiagų kritines trūkimo charakteristikas, bet ir audinių elgseną esant eksploataavimo apkrovoms [143, 144-146].

Tempiant liaunas, 45° kampu metmenų siūlų sistemos atžvilgiu kirptas austos struktūros medžiagas, stebimas bandinio balanso praradimo dėl deformacijų netolygumo reiškinys, dėl kurio susiformuoja klupimo raukšlė, kintanti didėjant tempimo deformacijoms. Austos struktūros medžiagų formos pastovumo problemos analizei netinka kontaktiniai metodai. Standartizuotais tyrimais ir įranga sudėtinga įvertinti įtempių pasiskirstymą tekstilės medžiagoje, siūloma tyrimus praplėsti pritaikant vaizdų analizavimo sistemas.

### 2.2.1 Bandinių paruošimo būdo parinkimas

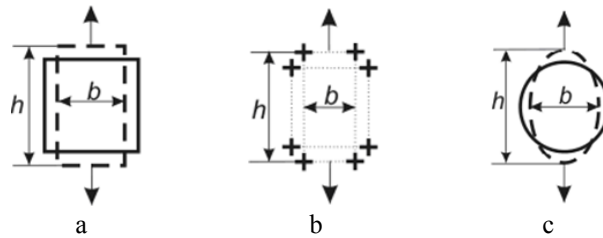
Analizuojant austų medžiagų elgseną specialus bandinių paruošimas – vienas svarbiausių etapų. Papildžius vienašį tempimo eksperimentą specialiu bandinių paruošimu (2.1 pav.) sudaroma galimybė fiksuoti ne tik bendrąsias deformacijas, bet ir lokalių deformacijų susidarymo zonas.



2.1 pav. Bandinių paruošimo schema: a – I tipo statmenai susikertančių linijų tinklelis, b – II tipo kryželių tinklelis, c – III tipo skrituliukų tinklelis

Ženklavimo tinklelių, sudarytų iš statmenai susikertančių linijų (2.2 pav., a), kryželių (2.2 pav., b) ir skrituliukų (2.2 pav., c), poslinkiai matuojami vienašio tempimo metu (LST EN ISO 13934-1:2013) [147]. Tinkleliai užnešami tiesioginio skaitmeninio lazerinio ženklavimo, sublimacijos bei šilkografijos metodais.





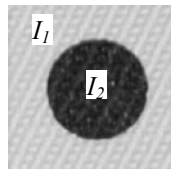
**2.2 pav.** Vaizduose matuojamų: a – keturkampių; b – kryželių; c – skrituliuko pločio ir aukščio rodikliai

Atliekant skaitmeninio vaizdo analizavimą, išmatuojamas skrituliuko ir kvadratėlio skersmens plotis  $b$  bei aukštis  $h$ . Kryželių poslinkiai įvertinami, nustatant kryželio centro koordinatas  $x$  ir  $y$  ašyse tarp dviejų gretimų taškų; pokytis paskaičiuojamas procentais.

Ženklinimo tinklelio slenkstinė vertė  $\Delta I$  leidžia įvertinti, ar pakankamas kontrastas tarp ženklinimo tinklelio ir tiriamo bandinio paviršiaus, t.y. ar ženklinimo tinklelis bus kokybiškai išskiriamas iš vaizdo. Ženklinimo tinklelio slenkstinė vertė  $\Delta I$  (2.3 pav.) įvertinama pagal pilkumo lygių skirtumą  $\Delta I$ :

$$\Delta I = I_1 - I_2, \quad (2.2)$$

čia:  $I_1$  – vidutinė bandinio spalvos vertė,  $I_2$  – vidutinė ženklinimo tinklelio spalvos vertė.



**2.3 pav.** Ženklinimo tinklelio slenkstinės vertės nustatymas

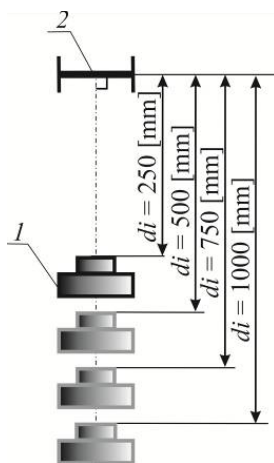
Jei užfiksuotame vaizde pilkumo lygiai  $I_1$  ir  $I_2$  yra vienodi arba artimi, vaizdų apdorojimo metu analizuojami objektai sunkiai atskiriami vienas nuo kito ir tolimesnei analizei netinkami.

Tyrimo metu patikrinta ženklinimo tinklelio įtaka tekstilės medžiagų savybėms, užrašant neženklintų bandinių ir bandinių su ženklinimo tinkleliais tempimo kreives bei atliekant morfologinę ženklinimo tinklelio ištyrimą mikroskopu, vaizdo didinimas 50 kartų.

### 2.2.2. Vaizdo fiksavimo atstumo bei apšvietimo kampo įvertinimas

Siekiant sudaryti vaizdų analizavimo metodiką, skirtą skirtingo liaunumo medžiagų deformacinių savybių vertinimui, svarbu nustatyti pradines vaizdo fiksavimo sąlygas.

Optimalus fotografavimo atstumas tarp bandinio (2) ir fotoaparato objektyvo lęšio ( $I$ ) įvertinimas keičiant fotografavimo atstumą  $d_i$  (2.4 pav.):  $d_1 = 250$  mm,  $d_2 = 500$  mm,  $d_3 = 750$  mm,  $d_4 = 1000$  mm. Atliekama pamatinio (skenuoto) ir eksperimentinio vaizdų sudėtis [148], įvertinama skiriamos gebos įtaka vaizdo kokybei [139].



2.4 pav. Fotografavimo atstumo įvertinimo schema

Atliekant fotografuoto ir pamatinio vaizdų palyginimą, įvertinami fotokameros objektyvo optiniai iškreipimai. Straipsnyje [4] teigiama, kad vaizdų atkūrimo sistemose pritaikius skenerį sukontroliuojamos apšviestumo, atstumo charakteristikos. Vaizdai neturi įtakos optinio iškreipimo problema, atsirandanti dėl fotokameros lęšio savybių. Atliekant vaizdų palyginimą nedeformuoti bandiniai skenuojami *CanoScan 4400F* skeneriu, vaizdo skyra 1200 dpi, bei fotografuojami skaitmenine fotokamera *Olympus E620*. Fotokameros techninės charakteristikos bei fotografavimo režimai pateikiami 2.7 lentelėje.

2.7 lentelė. Skaitmeninės fotokameros Olympus E620 charakteristikos

Charakteristika	Parametras
Židinio nuotolis	18 mm
Vaizdo skyra	4032 × 3024
Jautrumas (ISO)	200
Fotoobjektyvo lęšis	14 – 42
Šviesumas	f 5.6

Vaizdai apdorojami specializuota *Image J* programa. Sudarytas vaizdų apdorojimo algoritmas: vaizdus atkuria kaip dviejų dimensijų matricą, išskiria dominančius regionus, skenuoti ir fotografuoti vaizdai sudedami. Pamatinio (skenuoto) vaizdo mastelis (*angl. zoom*) keičiamas pagal fotografuoto atvaizdo dydį.

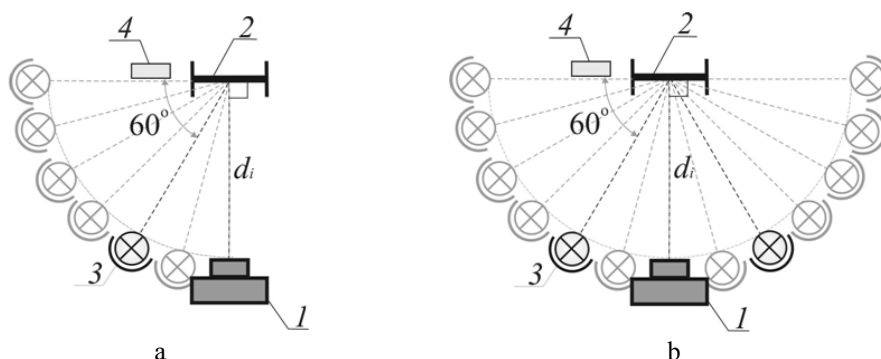
Skiriamosios gebos įtaka vaizdo kokybei įvertinama horizontalia ir vertikalia kryptimis, skaičiuojamos matuojamų verčių paklaidos [139, 61], kur:

$$\Delta x = \frac{x}{n} \text{ ir } \Delta y = \frac{y}{m}, \quad (2.3)$$

čia  $x$  ir  $y$  – matuojamo objekto matmenys,  $n$  ir  $m$  – vaizdo elementų skaičius.

Apšviestumas vaizdų analizės metuose yra vienas iš svarbiausių veiksnių. Teisingas apšviestumo parinkimas padeda išgauti geresnį vaizdo kontrastą, tai pagerina visos sistemos darbą bei sumažina klaidų atsiradimo tikimybę [2].

Eksperimento metu objektai fotografuojami naudojant dviejų rūšių šviesos šaltinius: vienos ir dviejų 300 W *Philips* halogeninių lempų (spalvinė temperatūra 3000 K) šoninius apšvietimus. Vienos lempos (2.5 pav. a) ir dviejų lempų (2.5 pav. b) šoninis apšvietimas į bandinio plokštumą nukreipiamas kampu  $\gamma$ . Atliekant tyrimą bandinio vaizdai fiksuojami apšvietimo kampą keičiant kas  $15^\circ$  nuo  $0^\circ$  iki  $75^\circ$ . Fotografavimo atstumas  $d_i = 250$  mm.



**2.5 pav.** Apšvietimo parinkimo schema: 1 – skaitmeninė fotokamera, 2 – bandinys, 3 – šviesos šaltinis, 4 – linuotė: a – vienos lempos šoninis apšvietimas; b – dviejų lempų apšvietimas

Siekiant įvertinti apšvietimo įtaką vaizdo kokybei, atliekamas fotografuoto ženklavimo tinklelio sutapimo su pamatiniu vaizdu įvertinimas. Didesniam gautų rezultatų patikimumui pasirenkami kiti vertinimo rodikliai nei analizuojant fotografavimo atstumo  $d_i$  įtaką vaizdo kokybei. Vaizduose išmatuojamos skrituliukų skersmenų pločio  $b$  ir aukščio  $h$  vertės. Atliekamas šių rodiklių palyginimas.

Matavimo paklaida  $\delta_{S_i}$  įvertinama pagal vidutinį skrituliukų užimamą plotą  $S_{i\text{ vid}}$ , kuris paskaičiuojamas kaip juodos spalvos kiekis binariniame vaizde bandinius fotografuojant skirtingais atstumais ( $d_i = 25 \div 100$ ). Apskaičiuojama santykinė paklaida  $\delta_{S_i}$ :

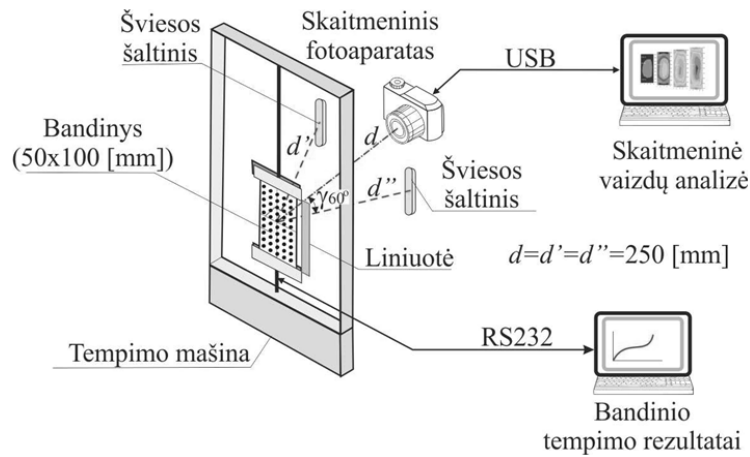
$$\delta_{S_i} = \frac{\Delta S_{i\text{ vid}}}{S_{i\text{ vid}}} \quad (2.4)$$

čia:  $\Delta S_{i\text{ vid}} = S_{r\text{ vid}} - S_{i\text{ vid}}$

Kompleksinė matavimo neapibrėžtis nustatyta pagal EN ISO 15725 standartą, įvertinant matavimo metodų patikimumą bei sisteminę paklaidą.

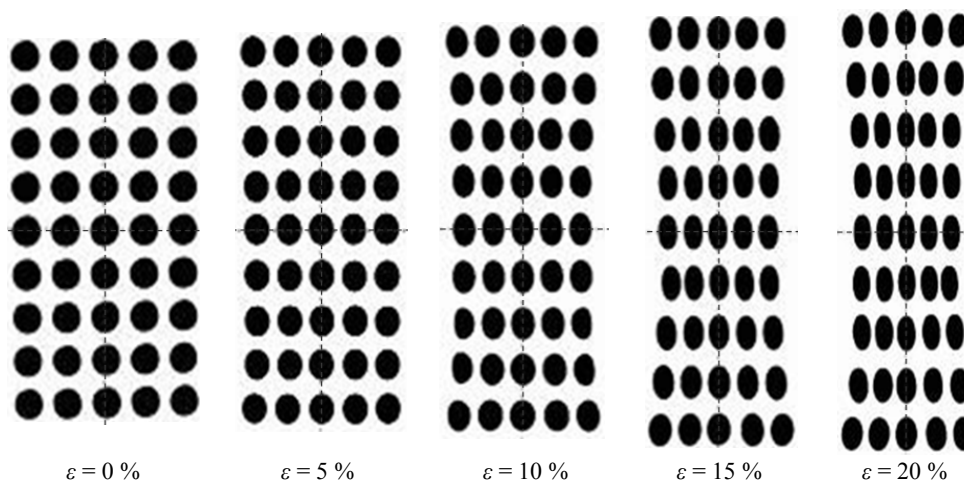
### 2.2.3. Vaizdų analizės metodikos sudarymas

Siekiant nustatyti vienašiu tempimu deformuojamų liaunų medžiagų deformacines savybes, pasirinktas standartizuotas vienašis tempimo bandymas (LST EN ISO 13934-1:2013). Bandiniai tempiami metmenų, ataudų ir įstriža ( $45^\circ$  kampu į metmenų siūlų sistemą) kryptimis.



2.6 pav. Deformuojamų bandinių vaizdų fiksavimo schema

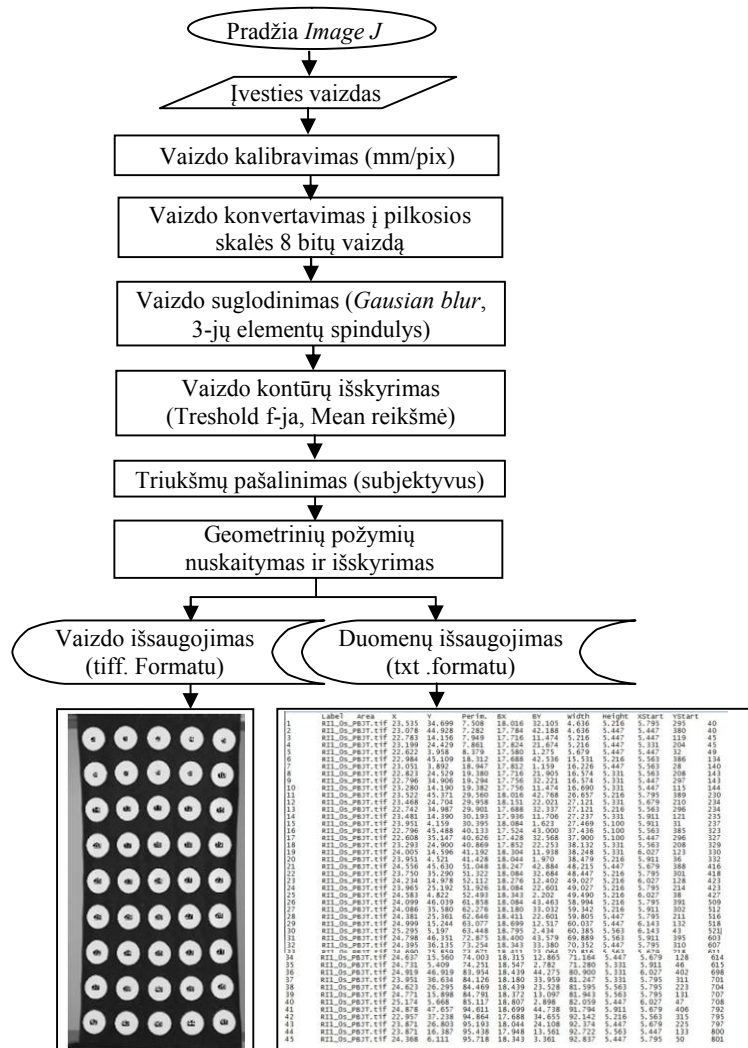
Bandiniai eksperimento metu deformuojami vienašiu tempimu (2.6 pav.). Tempimo mašina *Tinius Olsen H10KT* užrašoma tempimo kreivė  $F - \varepsilon$ . Tyrimams naudotas jėgos jutiklis, registruojantis maksimalią 1000 N apkrovą, viršutinio sprastuvo judėjimo greitis 10 mm/min, darbinės zonos ilgis 100 mm. Deformuojamo bandinio vaizdai fiksuojami skaitmeniniu fotoaparatu ištiesai didėjant kas 5 % iki momento, kai deformuojamo bandinio ištiesa pasiekia 20 % santykinio pailgėjimo ribą (2.7 pav.). Kiekvienas eksperimentas pakartotas 3 ÷ 5 kartus. Skaitmeninis fotoaparatas stacionariai įtvirtinamas priešais bandinį, fotoaparato objektyvo optinė ašis nukreipiama statmenai į fotografuojamo bandinio plokštumą atstumu  $d = 250$  mm. Bandinys apšviečiamas dviem 300 W *Philips* halogeninėmis lempomis (spalvinė temperatūra 3000 K), kurios į bandinio plokštumą nukreipiamos  $60^\circ$  kampu, 250 mm atstumu ( $d' = d''$ ). Fiksuojamų vaizdų kalibravimui šalia bandinio tvirtinama liniuotė, kurios padalos vertė 0,5 mm (2.6 pav.).



2.7 pav. Skrituliukų deformavimo eiga tempimo metu, kai  $\varepsilon_{ij}$  kinta intervale 0 ÷ 20%

Vaizdo analizavimas atliekamas *ImageJ* vaizdų apdorojimo programa. Fotografuotame bandinio vaizde išskiriama dominanti sritis ir atliekamas vaizdo kalibravimas, kur realūs objekto matmenys, matuojant objekto plokštumoje pridėtą liniuotę, priskiriami tam tikram vaizdo elementų skaičiui. Spalvotas 16 bitų vaizdas pervedamas į pilkosios skalės 8 bitų vaizdą. Siekiant pašalinti triukšmus, taikoma vaizdo glodinimo funkcija. Panaudojant *Gaussian Blur* filtrą, atliekamas vaizdo spalvų vidurkinimas, sumažinamas pilkumo lygio išsibarstymas vaizde. Dominantys požymiai atrandami pagal vienodas charakteristikas – pilkumo lygių skirtumą, aptinkant ribą tarp šviesios ir tamsios vaizdo dalies (2.8 pav.).

Tokiu būdu išsaugomos pagrindinės bandinio savybės, t.y. ženklinimo tinklelio padėtis bei skrituliukų tarpusavio išsidėstymas. Apdorotuose vaizduose, išskyrus geometrinius objektus, atliekamos matematinės manipuliacijos su vaizdais.

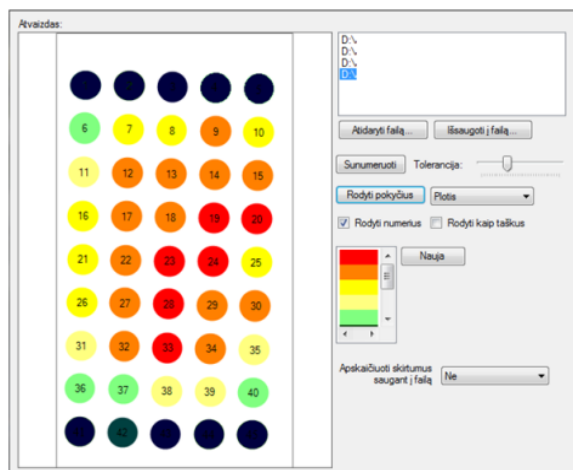


2.8 pav. Vaizdo analizavimo algoritmas su *Image J*

*Image J* programa papildyta paprograme *KTU\_Image JD* (2.9 pav.), kuri skirta iš txt failo išrinkti dominančius duomenis, atlikti matematinės operacijas su jais ir pagal skrituliuko vietą bandinyje sudėti į taisyklingus skaičių masyvus.

Sudarant *KTU\_Image JD* paprogramę buvo iškelti šie programavimo tikslai:

- Sukurti nesunkiai įsisavinamą, nebrangią programinę įrangą, leidžiančią vartotojui nustatyti skrituliuko skersmens  $\Delta b$ ,  $\Delta h$ , ploto  $\Delta S$  ir perimetro  $\Delta P$  pokyčius, juos įvertinti pagal skrituliuko centro koordinatas, palengvinant bei paspartinant vaizdų analizavimo procesą.
- Sudaryti lengvai valdomą ir programuojamą lankstų programinį modelį, kuris įgalintų greitai ir kokybiškai modifikuoti programinę įrangą tolimesniems tyrimams.
- Užtikrinti tyrimų rezultatų išvedimą *xls* formatu.



2.9 pav. *KTU\_Image JD* kompiuterinės paprogramės vaizdas

*KTU ImageJD* paprograme sumodeliuojamas bandinio vaizdas, skrituliukus išdėstant eilės tvarka. Kiekvieno skrituliuko geometriniai rodikliai yra perdujami į *Microsoft Office Excel* programą, kur toliau atliekama matematinė rezultatų analizė. Programos kodas pateikiamas prieduose.

#### 2.2.4. Vertinimo rodiklių pasirinkimas

Paruoštuose vaizduose išmatuojamas kiekvieno skrituliuko plotas  $S$ , perimetras  $P$  bei skersmenys  $b$  ir  $h$ . Audinio vietinėms deformacijoms nustatyti apskaičiuojamas kiekvieno skrituliuko ploto  $S$ , perimetro  $P$ , skersmenų  $b$  ir  $h$  pokyčio santykis. Pagal gautus duomenis analizuojamas skrituliuko formos pasikeitimas realiu laiku. Šių rodiklių pokytis skaičiuojamas pagal formules:

$$\Delta S_{ij} = \frac{S_0 - S_{ij}}{S_0} \times 100, \% \quad (2.5)$$

čia  $S_{ij}$  –  $i$  – ojo elemento deformacija  $j$  – uoju laiko momentu [mm],  $S_0$  – pradinis skrituliuko plotas [mm<sup>2</sup>].

$$\Delta P_{ij} = \frac{P_0 - P_{ij}}{P_0} \times 100 \%, \quad (2.6)$$

čia  $P_{ij}$  –  $i$  – ojo elemento deformacija  $j$  – uoju laiko momentu [mm],  $P_0$  – pradinis skrituliuko perimetras [mm].

$$\Delta b_{ij} = \frac{b_0 - b_{ij}}{b_0} \times 100 \%, \quad (2.7)$$

čia  $b_{ij}$  –  $i$  – ojo elemento deformacija  $j$  – uoju laiko momentu [mm],  $b_0$  – pradinis skrituliuko skersmuo skersine kryptimi [mm].

$$\Delta h_{ij} = \frac{h_0 - h_{ij}}{h_0} \times 100 \%, \quad (2.8)$$

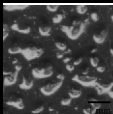
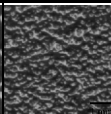
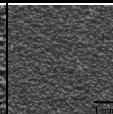
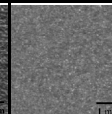
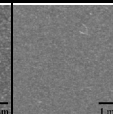
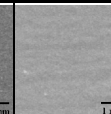
čia  $h_{ij}$  –  $i$  – ojo elemento deformacija  $j$  – uoju laiko momentu [mm],  $h_0$  – pradinis skrituliuko skersmuo išilgine kryptimi [mm].

Vietinių deformacijų vertės priklauso nuo bendros tempiamo audinio ištiesos  $\varepsilon$ . Didėjant ištiesai  $\varepsilon$  kinta ir užnešto ant audinio skrituliuko geometriniai parametrai.

### 2.3 Vaizdų analizės metodas audinių paviršiaus nusidėvėjimui vertinti

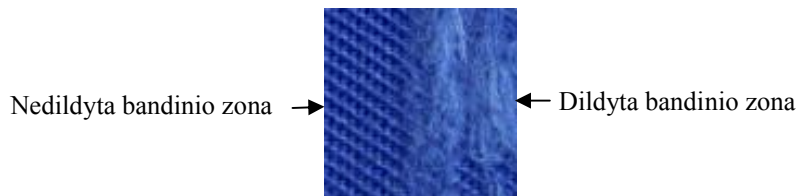
Siekiant išnagrinėti ir įvertinti tekstilės audinių paviršiaus nusidėvėjimą, tyrimo objektais pasirinkti skirtingą apsauginę paskirtį turintys audiniai (C1 ÷ C8), tarpusavyje besiskiriantys struktūra, dangos tipu bei mechaninėmis savybėmis (2.5 lent.). Bandinių nusidėvėjimas tiriamas juos dildant skirtingo numerio abrazyvais (2.8 lent.). Tyrimai atliekami kondicinėmis oro sąlygomis, kai palaikoma temperatūra  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , santykinis oro drėgnis  $(65 \pm 4)\%$ , pagal standarto ISO 139:2005 reikalavimus [149].

### 2.8 lentelė Eksperimento metu naudojamų abrazyvų charakteristikos

Abrazyvo grūdėtumo numeris (ISO)	40	120	280	600	1500	2500
Abrazyvo paviršiaus vaizdas						
Klasė	Stambūs			Smulkūs		
Vidutinis abrazyvo grūdelių skersmens dydis, ( $\mu\text{m}$ )	425	125	52,2	25,8	12,6	8,4

Tyrimo metu bandiniai dilinami *Rub Fastness Tester IG/10MOD* mašina, 400 dilinimo ciklą. Bandiniai į įrenginį įstatomi su 5 % pradiniu įtempimu, bandinio įveržimo zona 84 mm.

Bandinių paviršiaus struktūriniai pažeidimai įvertinami *FEI Quanta TM 200 FEG* elektroniniu mikroskopu, naudojant skirtingus vaizdo dalių didinimus: 50 ir 800 kartų. Tiriamas 10 x 10 mm bandinio dalis, į kurią įeina dildyta ir nedildyta zonos (2.10 pav.).



2.10 pav. Bandinio paviršiaus pažeidimų įvertinimas

Dildytų bandinių paviršiaus nelygumo tyrimui ir vertinimui skirtingo numerio abrazyvais bandiniai perlenkiami pusiau ir skenuojami *CanoScan 4400F* skeneriu, vaizdo skyra 1200 dpi. *ImageJ* programa atliekamas vaizdo kalibravimas, išskiriama dildymo zona ( $5 \times 20 \text{ mm}^2$ ) (žr. pav. 2.11), aptinkami bandinio kontūrai, aštuoniose vietose pamatuojami profilio mikronelygumai  $Z_i$  apskaičiuojamas vidutinis mikronelygumų aukštis  $R_z$ :

$$R_z = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 Z_i, \quad (2.13)$$



2.11 pav. Paviršinio sluoksnio bandinio C1 profilio vaizdas

Bandiniuose pažymima riba  $R_z$ , virš šios ribos esantys bandinio gijų plaukeliai išmatuojami, apskaičiuojamas didžiausių profilio mikronelygumų aukštis  $R_{max i}$ .

#### 2.4. Vaizdų analizės metodikos pritaikymas pradinio įtempimu įtempto kompozito deformacinės elgsenos tyrimui gamybos bei relaksacinio proceso metu

Tyrimui pasirinkti žinomų mechaninių charakteristikų armuoto kompozito bandiniai (2.10 lent.), kompozitų gamybos metu parinktas skirtingas įtempimas  $\varepsilon_{\text{prad}}$ . Sudaryta lokalių deformacijų tyrimo metodika vaizdų analizės metodu sudarė galimybę ištirti su pradinio įtempimu įtempto biokompozito deformacinę elgseną, nustatyti lokalių deformacijų pasiskirstymą bandinyje gamybos bei relaksacinio proceso metu. Gauti rezultatai papildė A. Širvaitienės tyrimus [151].

Tyrimė naudotų drobinio pynimo linių audinių D1 ir D2 charakteristikos pateiktos 2.9 lentelėje. Kompozitų gamybai naudota komercinės paskirties nesočiojo poliesterio derva Polylit 440-M850 ir methylethylperoksido katalizatorius Norpol MEK 1 (2% masės dalis). Biokompozito bandiniai paruošiami su pradine ir be pradinės deformacijos. Dėl retos audinio struktūros bandinių ženklavimui netiko 2.2.1 skyriuje pasirinktas ženklavimo būdas, todėl ant bandinių buvo užneštas reguliarios struktūros taškelių tinklėlis, atstumas tarp taškelių –  $10 \times 10 \text{ mm}$ . Į



tempų kompozitų gamybai naudojamas specialiai sukonstruotas originalus dviašio tempimo įrenginys (2.12 pav.), kuriame nejudamai įtvirtintas ženklintas bandinys (darbinės zonos dydis 165 x 165 mm) tempiamas iki numatyto dydžio pradinės deformacijos – 9, 11 ir 12 %, tokio dydžio deformacijos pasirinktos atsižvelgiant į tekstilės medžiagų deformacines savybes [114, 151], įtemptas tekstilės bandinys impregnuojamas polimerine derva ir paliekamas stingti kambario temperatūroje 24 valandoms. Sustingęs bandinys išimamas iš tempimo įrenginio.

**2.9 lentelė.** Tempimo įtaka kompozito savybėms tempiant ir lenkiant [150]

Charakteristika	Pradinis įtempimas, %	D1		D2	
		metmenys	ataudai	metmenys	ataudai
Stipris tempiant*, MPa	0	72,6	27,9	52,7	34,1
	9	65,4	32,3	57,8	40,2
	11	61,0	31,3	59,7	44,1
	12	60,3	30,0	51,4	39,3
Stipris lenkiant**, MPa	0	60,9	31,9	55,4	43,6
	9	87,4	60,1	71,4	61,4
	11	84,2	70,0	95,2	68,7
	12	69,8	55,3	82,4	93,2

\* nustatyta remiantis standarto EN ISO 527-4 reikalavimais.

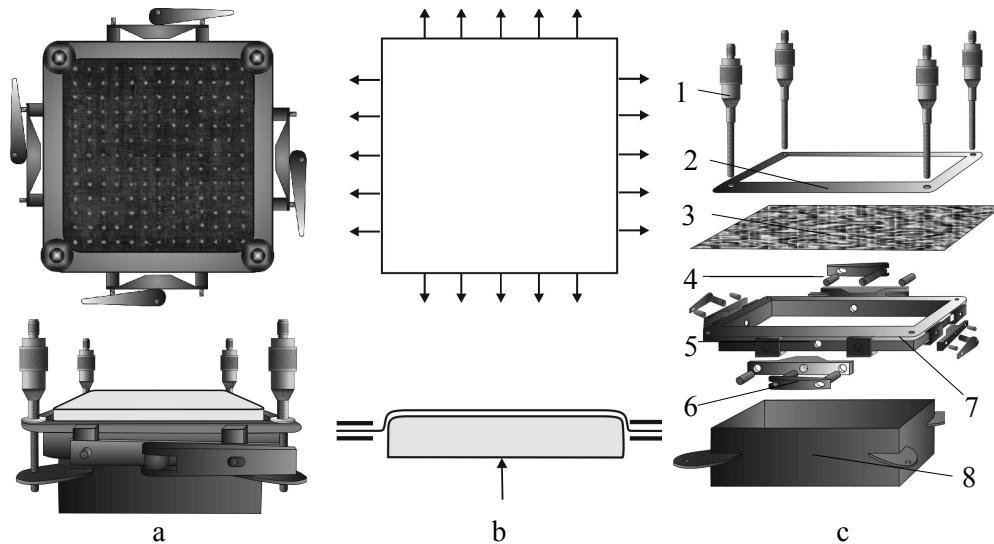
\*\* nustatyta remiantis standarto EN ISO 14125 reikalavimais.

**2.10 lentelė.** Armuojančių audinių mechaninės savybės

Armuojantis audinys	Stipris tempiant, N		Pailgėjimas tempiant, %		Grįžtamoji deformacija*, %	
	metmenys	ataudai	metmenys	ataudai	metmenys	ataudai
D1	896	600	14	20	35	63
D2	825	757	9	13	43	55

\* nustatyta remiantis standarto EN 14704-1 reikalavimais

Medžiagų lokalių deformacijų tyrimui naudojama *Image J* programa, papildyta specializuota paprograme *KTU Image JD*. Nustatoma kiekvieno taško koordinatė bei įvertinami poslinkiai atskirai x ir y ašyse (šios atitinka bandinio metmenų ir ataudų kryptį) tarp dviejų gretimų taškų. Iš poslinkių pokyčio apskaičiuojamos lokalsios deformacijos ir vidutinė lokali deformacija. Lokalių deformacijų pasiskirstymo tolygumas apskaičiuojamas pagal lokalių deformacijų vidutinį kvadratinį nuokrypį. Matavimai atliekami tik centrinėje, plokščioje bandinio dalyje (140 x 140 mm).



**2.12 pav.** Daugiaašio tempimo įrenginys: a – vaizdas iš viršaus, vaizdas iš šono; b – principinė įrenginio veikimo schema; c – daugiaašio tempimo įrenginio konstrukcija (1 mikrometras (4 vnt.), 2 viršutinis tvirtinimo rėmelis (1 vnt.), 3 audinys, 4 varžtai (8 vnt.), 5 įveržimo įrenginys (4 vnt.), 6 įveržimo rankenėlė (4 vnt.), 7 apatinis tvirtinimo rėmelis (1 vnt.), 8 apatinė forma (1 vnt.))

Bandinį formuojant su pradiniu įtempimu, lokali deformacijos matuojamos didinant bandinio pradinę deformaciją nuo 0 iki 12 %. Bandinių poslinkiai relaksacijos proceso metu matuojami išėmus bandinį iš tvirtinimo įtaiso ir skenuojant jo vaizdą tam tikrais laiko momentais: po 1, 30, 60, 360, 1440 min (1 para) bei 10080 min (7 paros) ir 43200 min (30 parų). Tuo tarpu neįtemptų bandinių relaksacinė elgsena stebima ir dervai stingstant. Kadangi dervai stingstant bandinį skenuoti sudėtinga, todėl poslinkiai buvo registruojami fotografuojant. Fotoaparatas nukreipiamas statmenai į bandinio plokštumą, fotografavimo atstumas 250 mm. Bandinys apšviečiamas naudojant tolygų dvipusį apšvietimą, fotografuojant bandinį po 1, 30, 60, 360, 1440 min (1 para) bei 10080 min (7 paros) ir 43200 min (30 parų).

### 3. TYRIMŲ REZULTATAI

#### 3.1 Lokalių deformacijų tyrimas ir vertinimas

##### 3.1.1 Bandinių ženklavimo būdo parinkimas

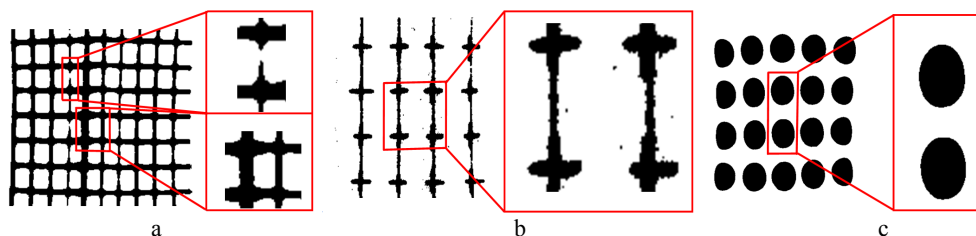
Daugiau kaip 90 % vaizdų analizės problemų atsiranda dėl bandinių paruošimo kokybės [41], dėl nehomogeniškos tekstilės medžiagos struktūros: aktytumo, pūko, paviršiaus nelygumo, skaitmeniniuose vaizduose gali atsirasti pašaliniai triukšmai. Parenkant bandinių ženklavimo būdą, atsižvelgiama į tokius kriterijus kaip tinklelio užnešimo paprastumas, vaizdo elementų su vienodomis charakteristikomis atpažinimas, konkrečių vaizdo elementų išskyrimas iš aplinkos bei tikslus tiriamojo objekto vaizdo atkūrimas [152].

Atlikus literatūros apžvalgą nustatyta, kad vertinant tekstilės medžiagų lokalių deformacijų pasiskirstymą bandinyje įvairūs autoriai naudoja skirtingą bandinių ženklimą, kurio pagalba atliekamos matematinės manipuliacijos su vaizdais [9, 82, 79, 91, 153-154]. Tyrimų metu pasirinkta bandinius ženklinti trijų tipų tinkleliais: statmenai susikertančių linijų tinklelis (I tipas), kryželių tinklelis (II tipas) bei skrituliukų tinklelis (III tipas). Vienašio tempimo metu atlikus skirtingai ženklintų bandinių vertinimą (žr. 2.1 pav.) gaunamos artimos maksimalios tiek pločio pokyčio parametro  $\Delta b$  vertės, tiek aukščio pokyčio parametro  $\Delta h$  vertės. Gauti rezultatai svyravo 0,14 % ribose (3.1.1 lentelė).

**3.1.1 lentelė.** Įstrižai tempiamų bandinių A1 maksimalios  $\Delta b_{ij}$  ir  $\Delta h_{ij}$  parametų vertės, kai bandinių pailgėjimas 20 %

Bandinio kryptis	Bandinio ženklinimas	$\Delta b_{20\ max, \%}$	$\Delta h_{20\ max, \%}$
Įstriža	I tipas	(-) 42,93	27,57
	II tipas	(-) 42,91	27,54
	III tipas	(-) 42,81	27,43

Bandinių, ženklintų I tipo pagalbinėmis linijomis (statmenai susikertančių linijų tinklelis), skaitmeninių vaizdų apdorojimo metu pasireiškia vaizdo kontūro nuskaitymo problemos. Ženklavimo tinklelio linijos nutrūksta arba sustorėja, linijų sankirtų vietose esantys kampai užapvalėja (3.1 pav., a).



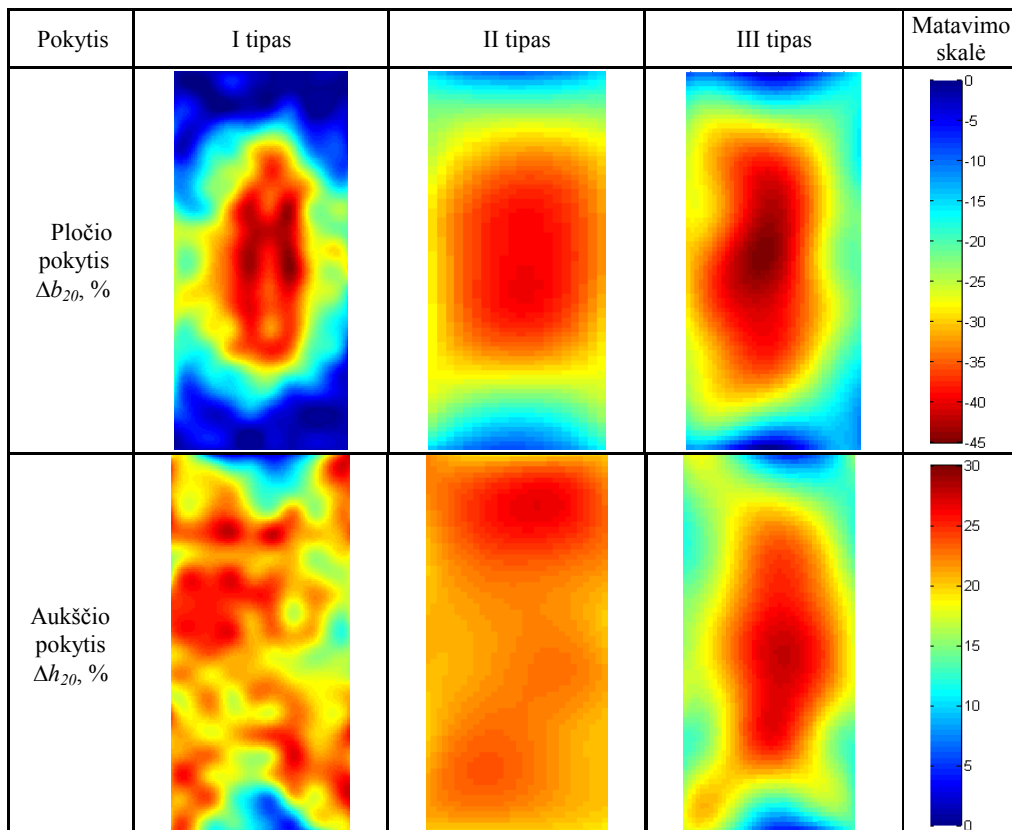
**3.1 pav.** Ženklintų bandinių (A1) išdidinto vaizdo fragmentai: a – I tipo tinklelis, b – II tipo tinklelis, c – III tipo tinklelis

Bandiniuose, ženklintuose kryželio tipo pagalbinėmis linijomis (II tipas), pradinėje vaizdų apdorojimo stadijoje pasireiškė daug pašalinių triukšmų, kuriuos

reikėjo pašalinti rankiniu būdu (3.1 pav., b) – tai apsunkina tiriamojo elemento kontūro nuskaitymą. Gautos lokalių deformacijų vertės, apskaičiuojant bandinio pločio pokytį  $\Delta b_{ij}$ , buvo artimos I tipo bandiniams, tačiau įvertinus aukščio pokytį  $\Delta h_{ij}$  tapo sunku išskirti lokalių deformacijų zonas (3.1.2 lentelė).

Vaizdų apdorojimo metu skrituliukų tinklelis (III tipas) nesudėtingai nuskaitymas bei atpažįstamas, gautuose vaizduose fiksuojamas nedidelis pašalinių triukšmų kiekis (3.1 pav. c).

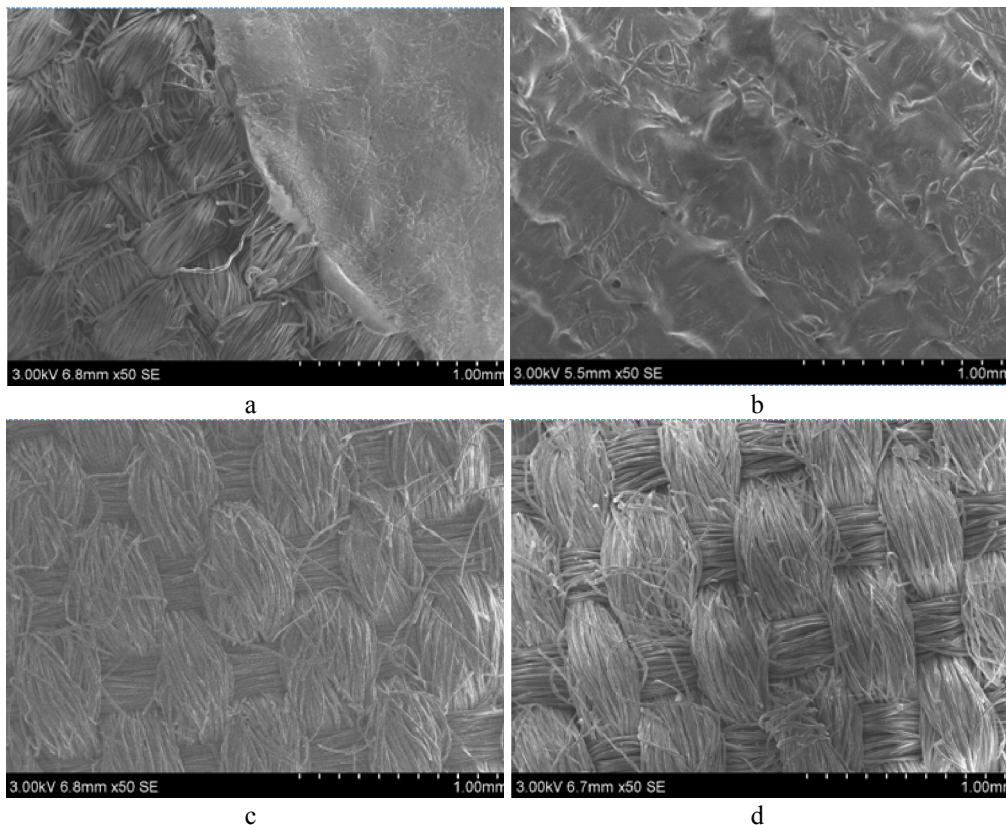
**3.1.2 lentelė.** Įstriža kryptimi temptų I, II ir III tipo A1 bandinių pločio pokyčio  $\Delta b_{ij}$  (%) ir aukščio pokyčio  $\Delta h_{ij}$  (%) diagramos, esant ištiesai  $\varepsilon = 20\%$



Tolimesniems tyrimams bandinius pasirinkta ženklinti III tipo apskritimų tinkleliu (3.1.1 pav., c), tai leido lokalias tempiamo bandinio deformacijas įvertinti keliais skirtingais vertinimo kriterijais. Galima pastebėti, kad panašų bandinių ženklšinimą savo darbuose naudojo ir kiti tyrėjai [9, 92]. III tipo ženklšinimo tinklelis lengvai atkartojamas “KTU\_Image JD” paprogramės pagalba, kur pilnavidurių skrituliukų ženklšinimo tinklelio elementai matematiškai aprašomi elipsių pagalba.

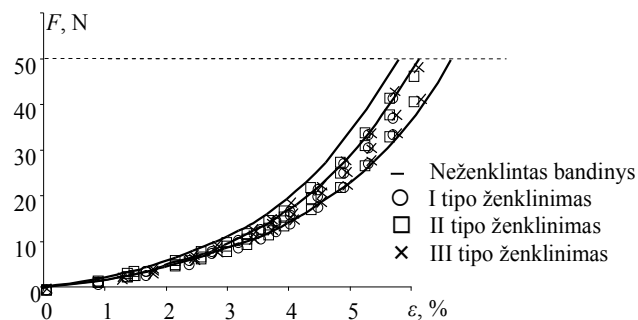
Tekstilės bandinių ženklšinimo metu svarbu, kad bandiniai išliktų lankstūs, nepakistų jų pradinės charakteristikos. Analizuojama spausdinimo technologijos įtaka medžiagos paviršiui. Pastaroji įvertinta morfologinės analizės metu, ištyrus

ženklintų bandinių paviršių. Bandiniuose, kuriuose panaudota šilkografijos spausdinimo technologija, skrituliuko spausdinimo vietoje užnešami dažai suklijavo audinio siūlinę sistemą bei apribojo siūlų sistemos paslankumą (3.2 pav., a). Transfero užnešimo metu visas bandinio paviršiaus plotas padengiamas plona plėvele (3.2 pav., b), siūlinės sistemos paslankumas apribojamas visame bandinyje. Bandiniuose, kuriuose pritaikytos sublimacijos (3.2 pav., c) bei tiesioginio skaitmeninio (3.2 pav., d) spausdinimo technologijos, nepastebima išorinių bandinių paviršiaus pakitimų.



**3.2 pav.** Spaudos ant audinio užnešimo vaizdas, bandinys didinamas 50 kartų: a – šilkografija (trafaretinė spauda), b – transferos užnešimas, c – sublimacija, d – tiesioginis skaitmeninis spausdinimas

A1 grupės bandinių metmenų krypties siūlų sistemoje buvo 70 % medvilnės, todėl sublimacijos spausdinimo technologija šio tipo bandinių ženklitimui yra netinkama, kadangi temperatūros ir slėgio veikiama tekstilės medžiaga gali keisti savo matmenis. Tiesioginis skaitmeninis (lazerinis) spausdinimas pasirinktas kaip tinkamiausias bandinių ženklitimo būdas.



**3.3 pav.** Tiesioginiu skaitmeniniu būdu ženklintų bandinių A1 tempimo kreivės

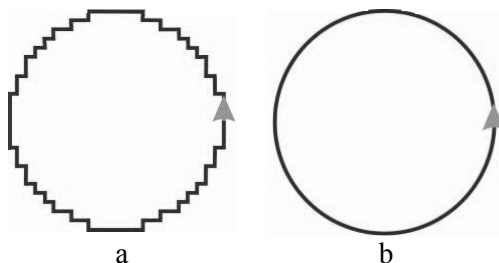
Užrašius neženklintų ir I, II bei III tipo tinkleliais ženklintų bandinių tempimo kreives ir jas palyginus mažų įtempių srityje (3.3 pav.), pastebima, kad tempimo kreivės persidengia. Pasirinktas ženklavimo būdas žymios įtakos medžiagos struktūrai ir elgsenai neturi, deformacinės savybės kito paklaidų ribose.

Analizuojant spaudos technologijos metodo parinkimo galimybes pastebėta, kad nėra vienintelio ir geriausio metodo – kiekvienam tiriamajam objektui reikia parinkti ženklavimo technologiją ir jos parametrus individualiai, atsižvelgiant į medžiagos tipą, sandarą ir sudėtį.

### 3.1.2 Vertinimo rodiklių parinkimas

Audinio deformavimo pobūdis nustatomas įvertinant skrituliuko ploto  $S$ , perimetro  $P$ , skersmenų  $b$  ir  $h$  pokyčius. Įstriža kryptimi kirpto bandinio A1 lokalių deformacijų pokyčio diagramos, esant  $\varepsilon_i = 15\%$ , pateikiamos 3.1.3 lentelėje.

Iš pateiktų diagramų pastebima, kad užnešto skrituliukų tinklelio poslinkis geriausiai išreiškiamas ploto  $S$ , skrituliuko skersmens pločio  $b$  ir aukščio  $h$  pokyčio diagramose  $\Delta S_{ij}$ ,  $\Delta b_{ij}$  ir  $\Delta h_{ij}$  (3.1.3 lentelė), kurios kinta didinant audinio ištįsą  $\varepsilon$ . Nustatyta, kad perimetro  $P$  pokyčio rodiklis  $\Delta P_{ij}$  lokalias deformacijas apibūdina netiksliai (3.1.3 lent.). Šio rodiklio patikimumui įtakos turėjo skaitmeninio vaizdo prigimtis, kur skaitmeninis vaizdas suvokiamas kaip dvimatis skaičių masyvas (3.4 pav.).

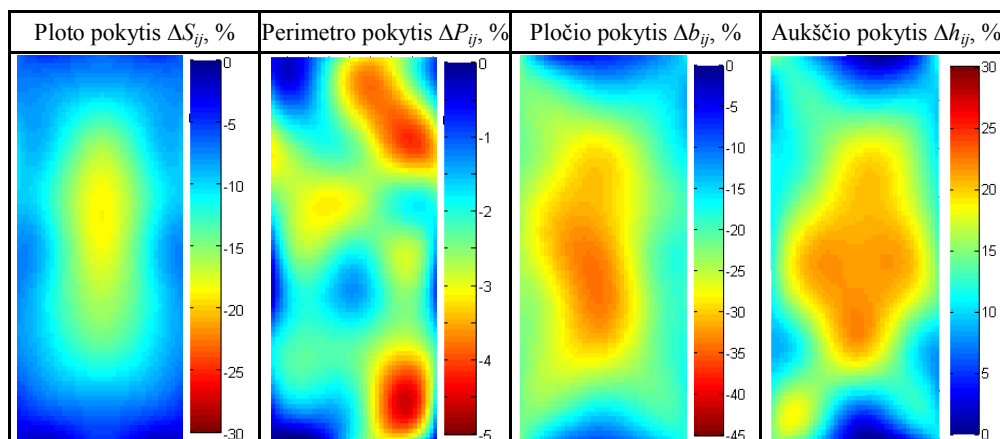


**3.4 pav.** Perimetro  $P$  matavimas: a – skaitmeninis vaizdas; b – realaus vaizdas

Tolimesniuose tyrimuose bandinio deformacijos vertinamos pagal  $\Delta b_{ij}$  ir  $\Delta h_{ij}$  rodiklius, kurie parodo tempiamo bandinio deformavimo pobūdį, kai tempimo deformacijos iššaukia bandinio susiaurėjimą – gniuždymą centrinėje dalyje.

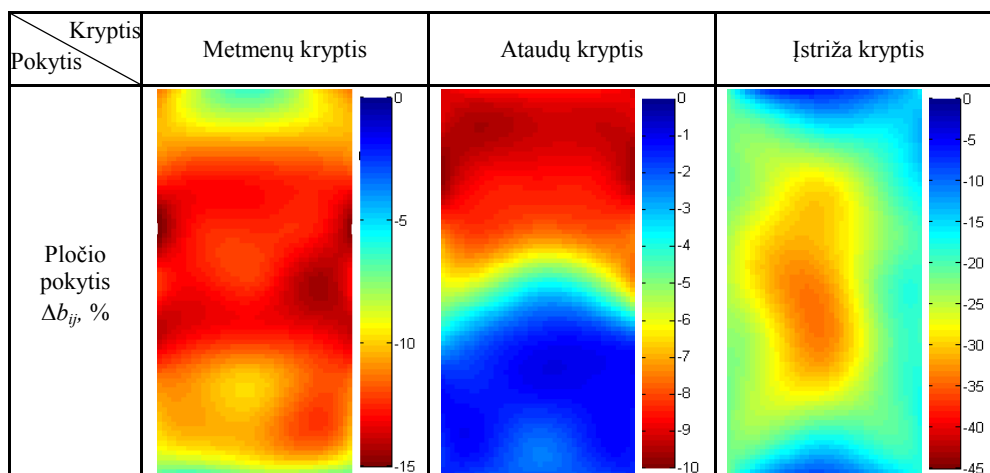
Apskaičiavus  $\Delta b$  ir  $\Delta h$  dydžius gautos skirtingo ženklo vertės:  $\Delta b$  rodiklis dėl tempimo metu pasireiškiančio gniuždymo įgyja neigiamą vertę, o  $\Delta h$  – teigiamą.

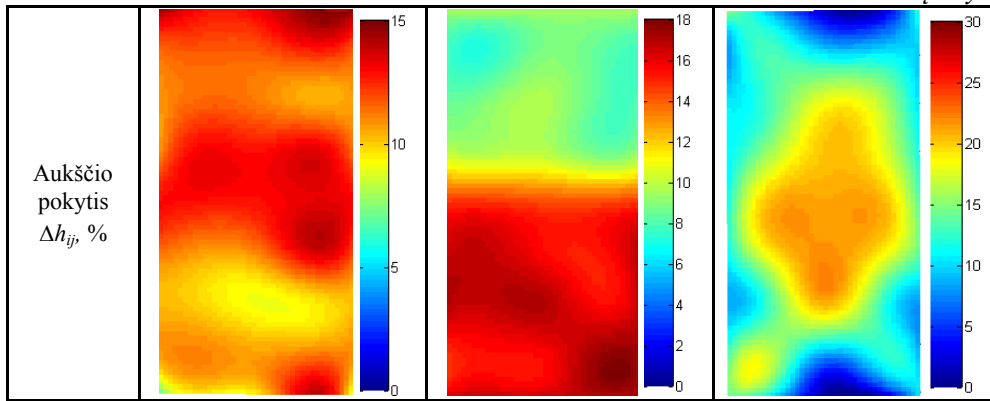
**3.1.3 lentelė.** Įstrižai tempiamo bandinio A1 lokalių deformacijų pokytis, esant  $\varepsilon_i = 15\%$



Dėl tekstilės medžiagoms būdingos anizotropijos, bandinių elgsena tempiant ataudų, metmenų bei įstriža kryptimis skiriasi. 3.1.4 lentelėje pateikti rezultatai rodo, kad skirtingomis kryptimis kirptuose bandiniuose A1 tempimo metu užfiksuojamos netolygios deformacijos, vertinant tiek pagal skrituliuko skersmens pločio  $b$ , tiek pagal skrituliuko skersmens aukščio  $h$  pokyčio rodiklius. Metmenų ir ataudų kryptimi kirptuose bandiniuose lokalių deformacijų zonos išsidėsto visame bandinio plotyje, o įstrižai tempiamuose bandiniuose deformacinės zonos koncentruojasi centrinėje bandinio dalyje.

**3.1.4 lentelė.** Skirtingomis kryptimis tempiamo bandinio A1 lokalių deformacijų pokytis, esant  $\varepsilon_i = 15\%$





Bandinių, kirptų metmenų kryptimi, skrituliukų skersmens pločio pokytis  $\Delta b_{ij}$ , esant  $\varepsilon = 15\%$  ištiesai, centrinėje dalyje kito nuo 11,2% iki 16,1%, o skrituliukų skersmens aukščio pokytis  $\Delta h_{ij} = 8,1\% \div 13,7\%$ . Dėl austos struktūros deformavimosi įpatybių bandinys tempimo metu patyrė didesnes deformacijas skersine kryptimi nei išilgine kryptimi.

Atlikus bandinių, kirptų ataudų kryptimi analizę, pastebime, kad bandinių ištiesai pasiekus  $\varepsilon = 15\%$ , bandinys gniuždomas  $\Delta b_{ij} = 1,0\% \div 9,4\%$  ribose, tuo tarpu tempimo kryptimi  $\Delta h_{ij}$  ištiesa svyruoja 7,7% ÷ 17,1% intervale. Bandinio ištiesai pasiekus  $\varepsilon = 19,7\%$  gaunamos maksimalios  $\Delta b_{ij}$  vertės, kurios kito nuo 1,0% iki 10,3%, o  $\Delta h_{ij}$  12,7% ÷ 21,9%. Bandiniai nutrūko, pasiekus  $\varepsilon = 19,7\%$  mm pailgėjimą. Iš gautų rezultatų bei deformacinių diagramų (3.1.4 lentelė) pastebima, kad tempimo metu atskirose bandinio dalyse susidaro tolygios, einančios per visą bandinio plotį deformacinės zonos. Ataudų kryptimi kirptų bandinių lokalios deformacijos tempimo kryptimi yra didesnės nei skersine kryptimi.

Palyginus apskaičiuotus skrituliukų skersmenų pločio  $b$  ir aukščio  $h$  pokyčio rodiklius bei išanalizavus lokalių deformacijų pasiskirstymo diagramas 3.1.4 lentelė nustatyta, kad didžiausios deformacijos fiksuojamos bandinius tempiant įstrižą kryptimi – čia susidariusios deformacijos pasiskirsto netolygiai, o pastarųjų forma atitinka literatūroje aprašytas [9, 155].

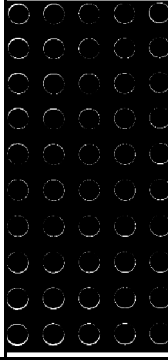
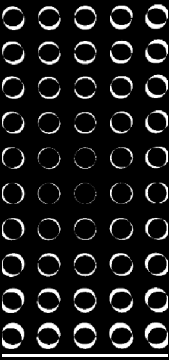
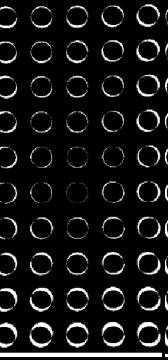
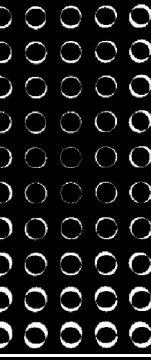
### 3.1.3. Objekto apšvietimo ir vaizdų fiksavimo sąlygų įvertinimas

Keičiant atstumą nuo fotografavimo taško iki objekto, keičiasi vaizdo elementų santykiniai dydžiai nuotraukoje. Eksperimento metu tiriamoje sistemoje siekiama surasti optimalų fotografavimo atstumą, kad fotografuojamame objekte neatsirastų perspektyvinis vaizdo mažėjimas, bandinio vaizdas neišsikraipytų, atitiktų realius matmenis [62].

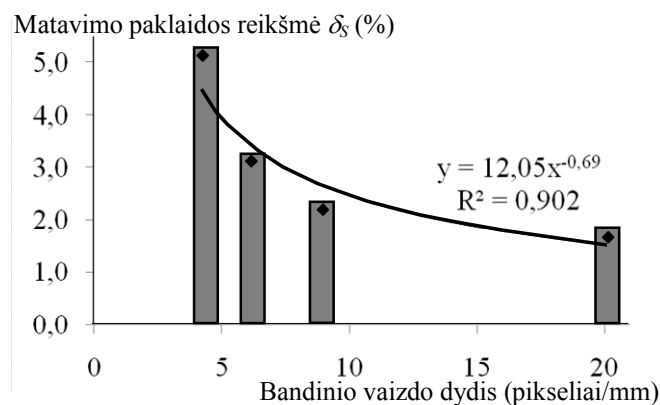
Fotografavimo atstumo įtaka analizuojama atliekant fotografuoto ir pamatinio (skenuoto) vaizdo sudėtį, keičiant fotografavimo atstumą  $d_i$ . Tyrimo rezultatai pateikti 3.1.5 lentelėje.



**3.1.5 lentelė.** Optinis vaizdo iškraipymas esant skirtingam atstumui  $d_i$

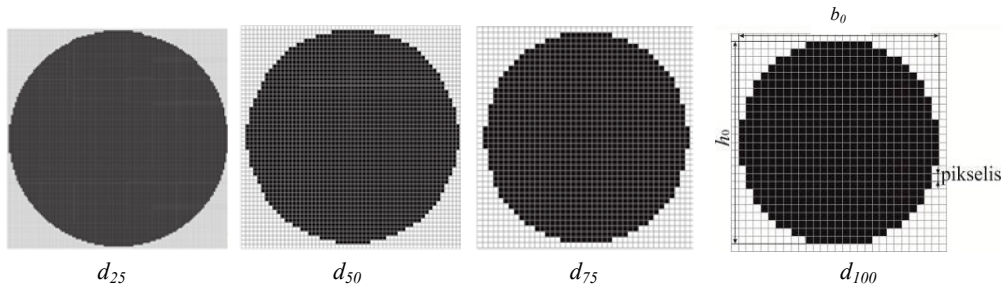
Apšvietimo tipas	Fotografavimo atstumas $d_i$			
	250 mm	500 mm	750 mm	1000 mm
300 W Philips halogeninė lempa, 3000 K				
Vaizdo elementų skaičius, pikselis	1014 × 2028	450 × 900	312 × 624	216 × 432

Eksperimento metu naudojamas į bandinio plokštumą  $\gamma_f = 60^\circ$  kampu nukreiptas dvipusis apšvietimas. Pastebima, kad tinklelių sudėties metu didėjant fotografavimo atstumui  $d_i$  mažėjo gautų vaizdų sutapimas, labiausiai pasireiškiantis bandinio kraštuose (3.1.7 lent.).



**3.5 pav.** Priklausomybė nuo vaizdo kokybės ir matavimo paklaidos

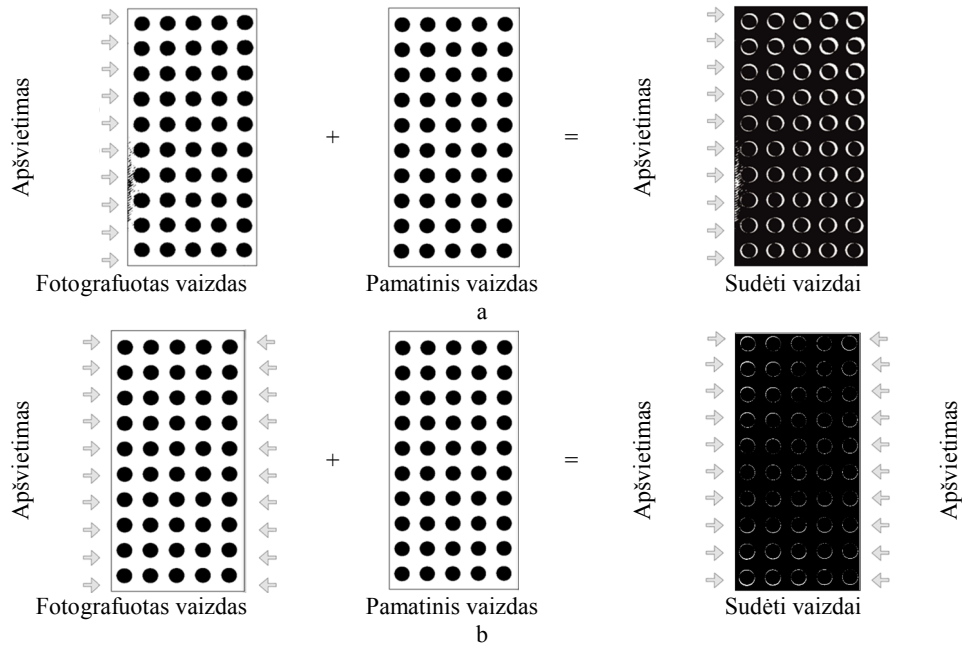
Atlikus skiriamosios gebos įtakos vaizdo kokybei vertinimą, nustatyta, kad didėjant fotografavimo atstumui  $d_i$  mažėjo bandinio vaizdo elementų skaičius, bei didėjo matavimo paklaida (3.5 pav.). Kai bandinys fotografuojamas 250 mm atstumu, gaunama mažiausia matavimo paklaida  $\delta_{S_i} = 1,7\%$ . Fotografavimo atstumui  $d_i$  pasiekus 1000 mm, matavimo paklaida didėja iki 5,1 % (3.5 pav. ir 3.6 pav.).



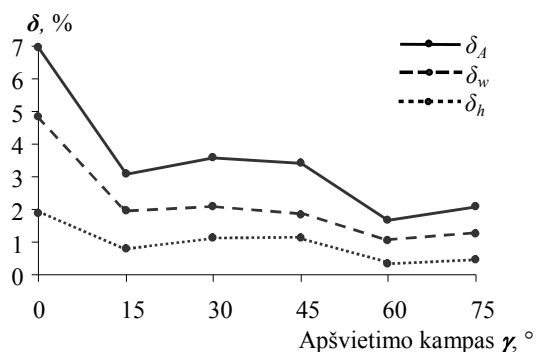
3.6 pav. Skaitmeninis tinklelio elemento atkūrimas, kai skirtingas fotografavimo atstumas  $d_i$

Fotografuojant atstumu  $d_i = 250$  mm, stebimi minimalūs vaizdo iškraipymai, sudėti vaizdai visame plote sutapo, o matavimo paklaida minimali  $\delta_{Si} = 1,7\%$ . 250 mm fotografavimo atstumas parinktas kaip tinkamiausias.

Analizuojant apšvietimo sąlygų įtaką vaizdų analizės rezultatams, išlaikomas pastovus fotografavimo atstumas  $d_i = 250$  mm, bet keičiamas apšvietimo į bandinio plokštumą kampas  $\gamma_j$ . Naudojant viopusį apšvietimą, bandinys apšviečiamas netolygiai, dėl siūlų sistemos paviršiuje susidaro šešėliai (3.7 pav., a). Kaip rodo moksliniai darbai [2, 4], toks apšvietimas geriausiai tinka siekiant išryškinti paviršiaus nelygumus bei audinių faktūrą. Eksperimento metu siekiama gauti neiškraipytą, tikslų vaizdą, tinkamą atlikti geometrinius matavimus, todėl šis apšvietimo būdas buvo atmestas, kaip netinkamas ir tolimesniems tyrimams naudojamas dvipusis apšvietimas (3.7 pav., b).



3.7 pav. Fotografuotų vaizdų sudėties schema, kai naudojamas kintamas apšvietimas bei pastovus fotografavimo atstumas ( $d_i = 250$  mm): a – viopusis apšvietimas; b – dvipusis apšvietimas



**3.8 pav.** Matavimo paklaidų priklausomybė nuo apšvietimo kampo  $\gamma_i$

Nustatyta, kad į bandinio plokštumą skirtingais kampais  $\gamma_j$  nukreipus dvipusį apšvietimą susidaro skirtingo dydžio paklaidos. Labiausiai vaizdas iškraipomas, kai bandinys apšviečiamas  $0^\circ$  kampu [2]. Šiuo atveju fotografuoto vaizdo tinklelis nuo pamatinio vaizdo skersine kryptimi  $b_0$  skyrėsi 4,6 %, išilgine  $h_0$  1,8 %, bendras bandinyje užimamas juodos spalvos plotas  $S_0$  skyrėsi 7,0 % (3.8 pav.).

**3.1.6 lentelė.** Apšvietimo kampo įtaka gaunamų rezultatų kokybei

Apšvietimo kampas, °	Santykine paklaida, %		
	$\delta_b$	$\delta_h$	$\delta_s$
0	4,8	1,9	7,0
15	2,0	0,8	3,1
30	2,1	1,1	3,6
45	1,9	1,1	3,4
60	1,0	0,3	1,7
75	1,3	0,5	2,1

Gauti rezultatai patvirtino, kad matuojamų tinklelio geometrinių parametru tikslumui įtakos turi fotografavimo atstumas bei bandinių apšvietimo kampas. Bandinį apšvietus  $15^\circ$  kampu gauti rezultatai pagerėja, gautos paklaidos ženkliai sumažėja (3.1.6 lent.), tačiau mažiausiai vaizdas iškraipomas, kai apšvietimas į bandinio plokštumą nukreipiamas  $60^\circ$  kampu: tokio eksperimento paklaidos neviršijo 1,7 %. Taikant  $75^\circ$  apšvietimą paklaida pradeda didėti ( $\delta_s$  siekia 2,1 %).  $90^\circ$  apšvietimas pritaikytas nebuvo, nes dėl optinių sistemos galimybių apribojimo nebuvo gaunamas pakankamas vaizdo kontrastas. Tolesniuose eksperimentuose tiriamus bandinius pasirinkta apšviesti naudojant dvipusį apšvietimą, šviesos šaltinį į bandinio plokštumą nukreipiant  $60^\circ$  kampu. Nustatyta, kad sudarant vaizdų analizės sistemą, reikia atlikti pirminius eksperimentus ir patikslinti tyrimo sąlygas [2].

**3.1.4. Vaizdų analizės metodo jautrumas tekstilės bandinio spalvai**

Analizuojant tyrimo rezultatus, nustatyta, kad nuskaitomo tinklelio kokybė priklauso nuo tiriamojo objekto paviršiaus savybių, apšviestumo, apšviestumo tolygumo, apšviestumo kampo, spalvinių bandinių charakteristikų ir kitų priežasčių

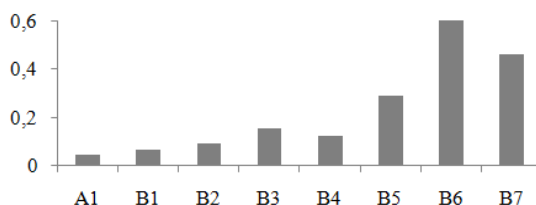
[15]. Atliekant jautrumo tekstilės bandinio spalvai analizę, kontūro aptikimo metu dominantys objektai išskiriami iš fono, tokiu būdu nagrinėjama pakitusi geometrinė objektų forma ir gaunami formą aprašantys parametrai. Remiantis šiais parametrais objektus galima identifikuoti bei klasifikuoti [1].

Atliekant metodo jautrumo bandinio spalvai įvertinimą, pristatomų vaizdų analizės metodu pasirenkama vienspalvių bandinių A1, B1 ÷ B4 grupė, margintas bandinys B5 ir margaraščiai B6 ir B7 bandiniai, analizuojami skaitmeniniai bandinių vaizdai. Tiriamųjų bandinių pradiniai vaizdai ir vaizdai po skaitmeninio vaizdų apdorojimo pateikiami 3.1.3 lentelėje.

**3.1.3 lentelė.** Testuojamos bandinių grupės B1 vaizdai

Bandinio kodas	A1	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Pradinis vaizdas								
Apdorotas dvispalvis vaizdas								
Vidutinis juodos spalvos plotas $S$ , $\text{mm}^2$	1530,39	1533,16	1520,05	1524,92	1544,88	2120,44	2663,74	2093,14

Taikant sudarytą vaizdų apdorojimo algoritimą, vienspalvių audinių A1, B1, B2, B3, B4 vaizduose buvo atpažinti visi skaitmeninio tinklelio skrituliukai, o juodos spalvos plotas, kuris netiesiogiai nusako užnešto tinklelio kokybę, kito leistinų paklaidų ribose. Vienspalviuose bandiniuose B3 ir B4 dėl mažesnio kontrasto tarp audinio ir ženklavimo tinklelio svyravo didesnės  $0,12 \div 0,15$   $CV$  indekso vertės (3.9 pav.), margintame bandinyje B5 ir margaraščiuose bandiniuose  $CV$  indekso vertės ženkliai išaugo, jos svyravo  $0,29 \div 0,46$  ribose.



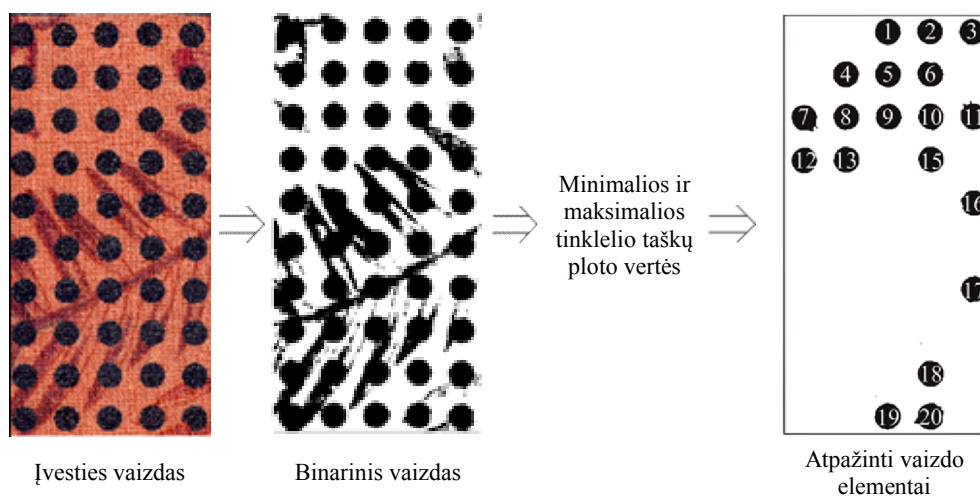
3.9 pav. Tiriamų bandinių A1, B1 ÷ B7 CV rodiklio vertės

Išanalizavus tirtų audinių kontrastą ir apskaičiavus spalvos intensyvumo skirtumą  $\Delta I$  pastebima, kad skirtingu spalviniu efektu pasižyminčiuose bandiniuose B5 ÷ B7  $\Delta I$  reikšmės ženkliai skyrėsi nuo vienspalvių bandinių  $\Delta I$  reikšmių (3.1.4 lent.). Kai  $\Delta I$  viršija 100, tinkelis atpažįstamas gerai ir vaizdo kontrastas pakankamas, kai spalvos intensyvumas  $\Delta I < 100$ , kontrastas galimi dideli netikslumai.

3.1.4 lentelė. Bandinio spalvos ir ženklinimo tinklelio kontrasto vertinimas

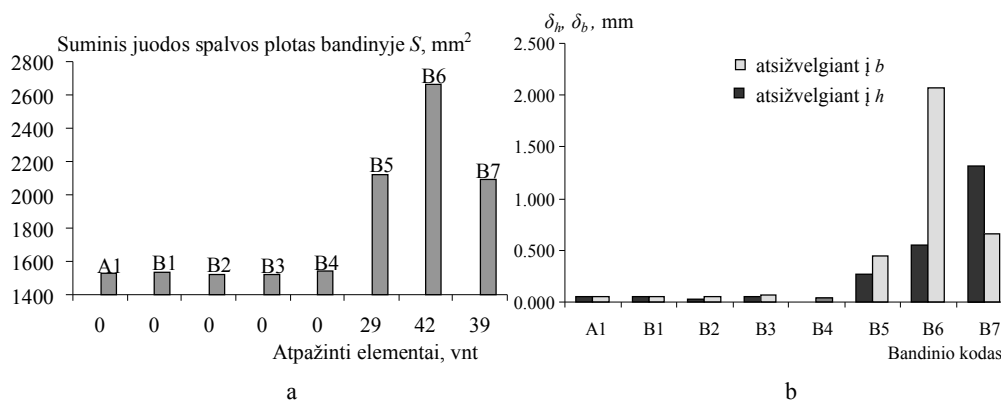
Bandiniai	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Bandinio fragmentas							
$I_1$	203,92	204,12	193,66	183,343	144,97	131,94	152,82
$I_2$	41,61	48,03	36,78	47,24	52,28	52,02	58,09
$\Delta I$	162,31	156,09	156,88	136,10	92,69	79,92	67,73

Atlikus vaizdo atkūrimo kokybės vertinimą su skirtingo tipo medžiagomis, nustatyta, kad metodas tinkamas medžiagoms, kurių vaizdai fiksuojami esant pakankamam kontrastui, t.y.  $\Delta I$  viršija 100.



3.10 pav. Bandinio B5 vardo apdorojimas bei vaizdo elementų atpažinimas

Tyrimų metu skaitmeniniai vaizdai verčiami dvispalviais. Vaizde randamas slenkstinė pilkumo vertė, už kurį tamsesnius pilkumo lygius turintys elementai įgyja juodą spalvą, o šviesesni baltą. Bandiniuose svarbu nustatyti ribą tarp tamsios ir šviesios vaizdo dalies, tinkamai aptikti ženklinimo tinklelio kontūrus [156]. Analizuojamuose vienspalviuose bandiniuose atpažįstami visi ženklinimo tinklelio elementai, spalviniu efektu pasižyminčiuose bandiniuose B5 ÷ B7 (3.10 pav.) ir (3.11 pav. b) suprastėjo ženklinimo tinklelio išskyrimo kokybę. Bandinyje B5 neatpažįstami 29 tinklelio elementai iš 50. Bandiniuose B6 ir B7 neatpažįstami 42 ir 39 tinklelio elementai (3.11 pav. a), tam įtakos turėjo bandinio raštas, kuris vaizdų apdorojimo metu persidengė su užnešamu tinkleliu.



**3.11 pav.** Atkuriamo tinklelio kokybės įvertinimas: a – priklausomybė tarp suminės juodos spalvos bandinio ploto ir atpažintų rutuliukų skaičiaus, b – atkuriamo tinklelio paklaidos  $\delta_h$  ir  $\delta_b$  įvertinimas apdorotame vaizde

**3.1.4 lentelė.** Išskiriamas vaizdas bandinyje B5 pritaikius skirtingas pilkumo lygio slenkstines vertes

Slenkstinė vertė	100	90	80	70
Vaizdų apdorojimo metu išskiriamas vaizdas bandinyje B5				

Siekiant sumažinti atsiradusias paklaidas margaraščiuose bei margintuose bandiniuose, gali būti pritaikomos papildomos vaizdų apdorojimo operacijos. Tuo tikslu *ImageJ* programoje *Threshold* funkcijos pagalba tarp juodos ir baltos spalvos keičiama slenkstinė pilkumo lygio vertė: B5 bandinyje (3.1.4 lent.) pilkumo lygio slenkstinė vertė kito nuo 100 iki 70, B6 – 85 ÷ 55, B7 – 71 ÷ 51 ribose. Galime pastebėti, kad mažėjant slenkstinei pilkumo lygio vertei ženkliai pagerėja ženklinimo tinklelio išskyrimas, geriausi rezultatai pasiekiami margintame bandinyje B5. Kai slenkstinis pilkumo lygis lygus 100, atpažįstami 29 tinklelio elementai, slenkstinį pilkumo lygį sumažinus iki 70 atpažįstami visi ženklinimo tinklelio elementai. Margaraščiuose bandiniuose B6 ir B7 išskiriama tinklelio kokybė pagerėjo, tačiau ženklinimo vietoje tinklelis persidengė su bandinio raštu ir išskiriamas tinklelio vaizdas buvo tolimas pradiniam vaizdui.

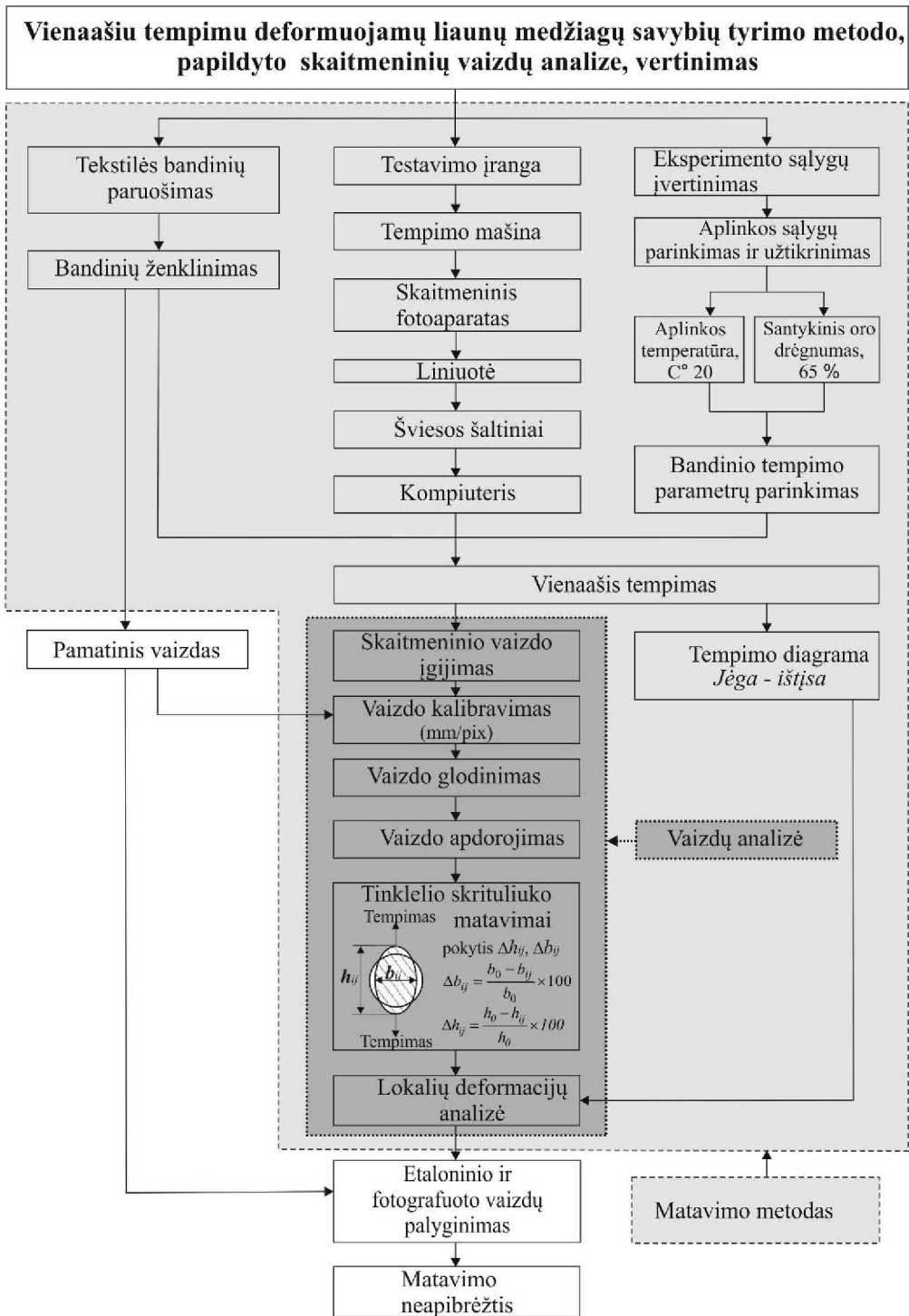
### 3.1.5. Vertinimo kriterijų patikimumas ir rezultatų neapibrėžtis

Matavimo rezultatas – skaičius, kuris geriausias matuojamojo dydžio įvertis. Neapibrėžtis susideda iš visų neapibrėžties sandų, įskaitant sisteminę paklaidą, pamatinių verčių netikslumus [157]. Išplėstinė neapibrėžtis yra kiekybinis dydis, nusakantis matuojamojo objekto verčių sklaidos intervalą, esant pasirinktam pasikliautinumo lygiui. Ji išreiškiama standartinė neapibrėžtimi.

Remiantis atlikta literatūros apžvalga galime pastebėti, kad specifiniai skaitmeninių vaizdų apdorojimo ir analizės metodai, skirti tekstilės savybių tyrimui ir vertinimui, nagrinėjami ne viename straipsnyje [9, 25, 80, 133]. Pastebima, kad mokslininkai skiria didelį dėmesį vaizdų analizavimo metodikai, tačiau dažnai jų darbuose pasigendama metrologinio patikimumo įvertinimo. Vertinant matavimo rezultatus, būtina parinkti kalibravimo, neapibrėžčių skaičiavimo metodikas.

Naudojant audinį A1 buvo atliktas vaizdų analizės metodo, pritaikyto lokalioms tekstilės medžiagų deformacijoms vienaašio tempimo metu tirti, metrologinio patikimumo vertinimas. Remiantis atliktais eksperimentiniais tyrimais bei sudarytu matematinio modeliu, parinktos optimalios metodo sąlygos ir metodika, kuri leidžia skaitmeniniuose vaizduose apskaičiuoti lokalių deformacijų vertes bei įvertinti gautų rezultatų patikimumą.

Skaitmeninio vaizdo analizei buvo pritaikytos vaizdo apdorojimo funkcijos: suglodinimas, slenksčiavimas bei išskirtų dominančių vaizdo elementų geometrijos vertinimas. Bandinio lokalių deformacijų pasikeitimas įvertinamas apskaičiuojant kiekvieno tinklelio elemento aukščio  $h_{ij}$  ir pločio  $b_{ij}$  pokyčius  $\Delta h_{ij}$  ir  $\Delta b_{ij}$  kiekviename bandinio pailgėjimo žingsnyje  $\varepsilon$  (3.12 pav.).

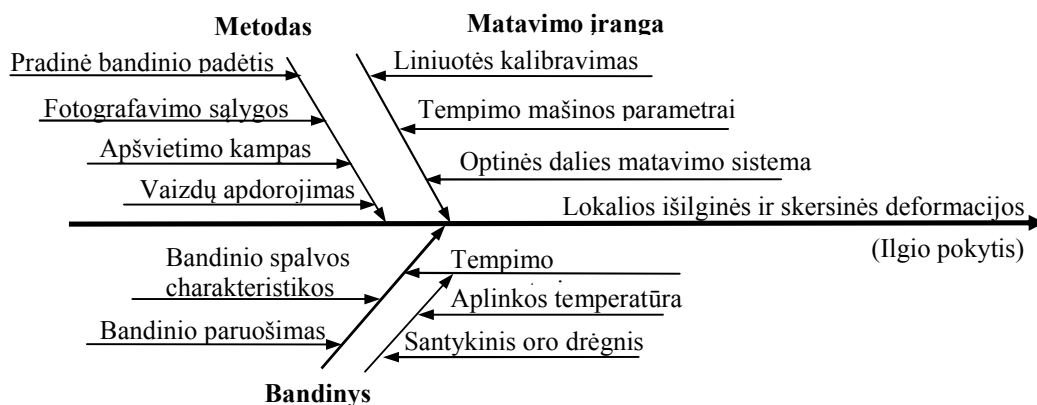


**3.12 pav.** Skaitmeninės vaizdų metodo neapibrėžties įvertinimo algoritmas



Tiriamo metodo neapibrėžties šaltiniai suskirstyti į tris grupes (3.13 pav.):

- matavimo įranga,
- bandinių parametrai,
- metodo įgyvendinimas.



3.13 pav. Skaitmeninio vaizdų analizės metodo neapibrėžties sandai

Atskirų matavimo sandų įtaka įvertinta apskaičiuojant matavimo rezultatų neapibrėžtį. Šiuo atveju matavimo rezultatas yra kiekvieno tinklelio skrituliuko skersmens aukštis  $h_{ij}$  ir skrituliuko skersmens plotis  $b_{ij}$  bandinio tempimo metu:

$$\delta b_{ij} = \frac{\Sigma(b_{ij} - b_{is})}{\Sigma b_{is}} \times 100, \quad (3.1)$$

$$\delta h_{ij} = \frac{\Sigma(h_{ij} - h_{is})}{\Sigma h_{is}} \times 100, \quad (3.2)$$

čia  $b_{ij}$ ,  $h_{ij}$  – fotografuoto bandinio tinklelio skrituliukų skersmenų aukščio  $h$  ir pločio  $b$  reikšmės  $i$  pailgėjimo momentu  $j$ ;  $b_{is}$ ,  $h_{is}$  – tinklelio skrituliukų skersmens pločio ir aukščio reikšmės  $i$  pamatiniame vaizde.

### 3.1.5.1 Suminės kombinuotos standartinės neapibrėžties vertinimas

Visi neapibrėžties sandai (dedamosios dalys) yra įtraukti skaičiuojant standartinę neapibrėžtį  $u_c(x)$  [134]. Suminė standartinė kalibruojamo mato ilgio nustatymo neapibrėžtis išreiškiama minėtų dydžių standartinių neapibrėžčių, įvertinant įtakos koeficientus, kvadratų suma [158]:

$$u_c^2(l) = \sum_{i=1}^N W_i^2 u^2(x_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[ \frac{1}{2} W_{ij}^2 + W_i \cdot W_{ijj} \right] u^2(x_i) u^2(x_j) \quad (3.3)$$

Standartinė neapibrėžtis, apimanti kombinuotą standartinę neapibrėžtį, yra skaičiuojama pagal:

$$u_i(y) \equiv |W_i|u(x_i) \quad (3.4)$$

Bandinio tempimo metu, esant normuotai temperatūrai, deformacija išreiškiama kaip ilgio pokytis  $\varepsilon$  ir apskaičiuojama:

$$\Delta l_\varepsilon = |l_\varepsilon - l_s| + \Delta l_{sc} + \Delta l_F + \Delta l_{ab} + \Delta l_d + \Delta l_\gamma + \Delta l_c + \Delta l_{dp} \quad (3.5)$$

čia  $\Delta l_\varepsilon$  yra deformacija (matuojama kaip ilgio pasikeitimas),  $l_s$  pamatinis nedeformuoto skrituliuko ilgis (nominali reikšmė 6 mm),  $l_\varepsilon$  matuojamas kiekvieno skrituliuko ilgis,  $\Delta l_{sc}$  iškraipymai, atsirandantys, dėl bandinio spalvos charakteristikų,  $\Delta l_F$  iškraipymai, atsirandantys bandinio tempimo metu,  $\Delta l_{ab}$  iškraipymai, atsirandantys dėl fotoobjektyvo lęšio charakteristikų,  $\Delta l_d$  iškraipymai, atsirandantys dėl fotografavimo atstumo,  $\Delta l_\gamma$  iškraipymai, atsirandantys dėl apšvietimo,  $\Delta l_c$  iškraipymai atsirandantys kalibravimo metu,  $\Delta l_{dp}$  iškraipymai, atsirandantys vaizdų apdorojimo metu.

Skaičiavimo metu yra naudojamas matematinis ilgio modelis, kuris išreiškiamas skrituliuko pločio ir aukščio pailgėjimu  $\varepsilon$ :

$$\Delta l_\varepsilon = |l_\varepsilon + l_s| - \Delta l_{sc} - \Delta l_F - \Delta l_{ab} - \Delta l_d - \Delta l_\gamma - \Delta l_c - \Delta l_{dp} \quad (3.6)$$

Pataisos  $\Delta l_{sc}, \Delta l_F, \Delta l_{op}, \Delta l_\alpha, \Delta l_\gamma, \Delta l_c, \Delta l_{dp}$  skaitine verte lygios nuliui. Tačiau jų įvertinimo standartinė neapibrėžtis nelygi nuliui ir turi būti apskaičiuota ir įtraukta į suminę standartinę neapibrėžtį. Skaičiuojant atskirų dedamųjų standartinę neapibrėžtį, priimama, kad jos tarpusavyje nekoreliuoja.

Kiti paklaidų šaltiniai neženkliai turėjo įtakos vaizdų analizės rezultatams, todėl, norint supaprastinti neapibrėžties skaičiavimo procesą, į juos buvo neatsižvelgta.

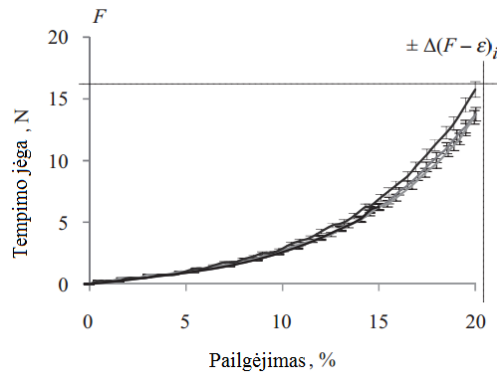
Eksperimentas buvo atliekamas kondicinėse oro sąlygose, kur oro temperatūra  $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , o santykinis oro drėgnis  $65\% \pm 2\%$ . Tokiu būdu neapibrėžtis, atsirandanti dėl aplinkos sąlygų svyravimo, yra labai nežymi ir gali būti neįvertinta. Tačiau labai svarbu, kad viso eksperimento metu laboratorijoje išliktų tos pačios aplinkos sąlygos.

Bandinio spalvos charakteristikos yra svarbios vaizdų atkūrimo ir analizės etapuose. Eksperimento metu skrituliukų ženklinimo tinklelis turi gerai išsiskirti iš aplinkos. Siūlomo vaizdų analizės metodo jautrumas bandinio spalvos charakteristikoms buvo įvertintas 3.3.1 skyrelyje ir nustatyta, kad metodas tinkamas vienspalvėms medžiagoms, vaizdo kontrastas  $\Delta I$  daugiau 100. Eksperimentinių duomenų analizė rodo, kad medžiagos ženklinimo būdas turi įtakos vaizdo (ženklinimo tinklelio) identifikavimo rezultatams, rezultatai svyravo 0,14 % ribose. Naudojant tolygųjį pasiskirstymą buvo skaičiuojama absoliutinė standartinė neapibrėžtis:

$$u(\Delta l_{sc}) = \frac{0,14\% \times 6(\text{mm})}{100\% \times \sqrt{3}} = 0,012(\text{mm}) \quad (3.7)$$

Tempimo mašina susieta su aukštesnio lygmens priemonėmis taikant patikros procedūrą, tą liudija tempimo mašinos gamintojo patikros sertifikatai. Bandinio tempimo metu, kai analizuojamas bandinio pailgėjimas  $\varepsilon$   $j$ -uoju laiko momentu, keičiantis bandinio ilgiui, keičiasi deformuojamo ženklinio elemento geometrija. Medžiagos tempimo kreivė rodo, kad egzistuoja priklausomybė tarp jėgos ir bandinio deformacijos. Iš tempimo diagramos (3.14 pav.) matyti, kad kintant tempimo jėgai gaunama skirtinga paklaida  $\Delta l_F$ . Deformacijos paklaida esant 5N tempimo jėgai lygi 0,069 mm, 10N tempimo jėgai 0,090 mm, 15 N tempimo jėgai lygi 0,100 mm, o tempimo jėgai pasiekus 20N lygi 0,113 mm. Tempimo jėgos standartinė neapibrėžtis apskaičiuojama naudojant tolygųjį skirstinį:

$$u(\Delta l_F) = \pm \frac{\Delta l_F}{\sqrt{3}} \quad (3.8)$$



**3.14 pav.** Tempimo kreivės, kai tempimo mašinos tikslumo klasė yra 0,5, apkrovos diapazonas svyruoja nuo 0 iki 1000N

Siekiant įvertinti metodo pakartojamumą, eksperimentas buvo kartojamas su 10 bandinių tomis pačiomis sąlygomis: paliekant tą pačią matavimo procedūrą, tą patį operatorių, tą pačią testavimo ir fotografavimo įrangą, tose pačiose laboratorinėse sąlygose bei naudojant tą patį bandinių paruošimą.

Ilgio įvertinimo neapibrėžtis  $s(\Delta l_\varepsilon)$  daugkartiniams matavimams laikoma išmatuoto ilgio pokyčio (pločio  $\Delta b_{ij}$  ir aukščio  $\Delta h_{ij}$ , įvertinto visame bandinio plote) standartinis nuokrypis:

$$s(\Delta l_\varepsilon) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\Delta l_{ik} - \bar{\Delta l}_{ik})^2}{k-1}} \quad (3.9)$$

čia  $\Delta l_{ik}$  matuojama  $i$ -tojo tinklelio skrituliuko ilgio pokyčio reikšmė priklausanti nuo bandinio  $k$  ( $k=10$ ),  $\bar{\Delta l}_{ik}$  yra  $i$ -tųjų ženklinto tinklelio skrituliukų bandinyje  $k$  ilgio pokyčių vidurkis (buvo atlikta 10 matavimų, kiekvienam  $i$ -tajam tinklelio taškui):

$$\bar{\Delta l}_{ik} = \frac{1}{10} \cdot \sum_{i=1}^{10} \Delta l_{ik} \quad (3.10)$$

Bandinio ilgio pokyčio pakartojamumas (skirtingam bandinio pailgėjimui)  $s(\Delta l_\varepsilon)$  vidutiniškai yra lygus 0,062 mm.

Eksperimentas buvo pakartotas su kitu operatoriumi ir rezultatuose buvo gauti nežymūs pokyčiai.

Sudėtinga nustatyti, kuri optinės sistemos dalis turi įtakos matavimo neapibrėžties rezultatams. Vaizdas gali būti iškraipomas dėl lęšio optinių savybių: nuotraukos centre ir jos kraštuose gaunami skirtingi ženklintų skrituliukų matmenys. Mažiausi vaizdo iškraipymai dėl lęšio pasireiškia bandinio centrinėje dalyje [18]. Eksperimento metu naudojama centrinė nuotraukos dalis. Čia fotoaparato objektyvo optinė ašis fiksuojama statmenai fotografuojamo bandinio plokštumai, toje pačioje linijoje kaip ir centrinė bandinio linija. Neapibrėžties sandus sąlygoja iškraipymų paklaidų atsiradimas. Jie apskaičiuojami kaip rezultatų sklaida, priklausanti nuo visų tinklelio skrituliukų išilgine ir skersine bandinio kryptimis, kai bandinio pailgėjimas  $\varepsilon=0$ .

$$s(\Delta l_{ab}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{50} (l_{in} - \bar{l}_n)^2}{n-1}} \quad (3.11)$$

čia  $l_{in}$  yra to paties bandinio ( $n = 1...50$ ) Pamatuota  $i$ -tojo skrituliuko tinklelio reikšmė,  $\bar{l}_n$  yra vidutinė  $i$ -tojo skrituliuko ilgio reikšmė tame pačiame bandinyje.

Vaizdų fiksavimo sąlygos vaizdų analizėje yra labai svarbios. Naudojant sudarytą vaizdų analizavimo metodiką, kai analizuojami geometriniai kiekvieno ženklavimo elemento parametrai, siekiant išvengti vaizdų iškraipymo ir gauti patikimus matavimo rezultatus, fotografavimo metu tarp fotoaparato ir bandinio turi būti išlaikytas  $90^\circ$  kampas.

Optinė paklaida dėl lęšio iškraipymų yra mažiausia, esant didžiausiai bandinio vaizdo skiriamajai gebai (1014 x 2028), kai fotografavimo atstumas lygus 250 mm. Šiuo atveju vertikalioje ir horizontalioje kryptyse fiksuojami mažiausi optiniai iškraipymai, lygūs 0,05 mm. Standartinė neapibrėžtis skaičiuojama:

$$u(\Delta l_d) = \frac{\Delta}{\sqrt{12}} = 0,05 \text{ mm} \quad (3.12)$$

Nustatyta, kad optiniams iškraipymams bei matavimo metu gautiems rezultatams įtakos turėjo apšvietimo tipas ir kokybė. Matavimo metu dėl šviesos atsispindėjimo nuo bandinio plokštumos užfiksuotuose vaizduose atsiranda sričių, kuriose sudėtinga atlikti vaizdų analizę. Eksperimento metu nustatyta, kad optimalus apšvietimas yra dvipusis  $60^\circ$  kampu į bandinio plokštumą nukreiptas apšvietimas. Šiuo atveju matavimo paklaida siekė  $\Delta b_\gamma = 0,061$  mm,  $\Delta h_\gamma = 0,018$  mm. Standartinė neapibrėžtis apskaičiuojama:

$$u(\Delta l_\gamma) = \frac{\Delta w_\gamma}{\sqrt{12}} \text{ or } \frac{\Delta h_\gamma}{\sqrt{12}} \quad (3.13)$$

Tyrimuose užfiksuotas skaitmeninis tiriamojo objekto vaizdas buvo palygintas su pamatiniu (skenuotu) to paties objekto vaizdu. Pamatinio vaizdo skiriamoji geba 1200 dpi. Vaizdų palyginimo metu nustatoma ženklavimo paklaida, kur pamatinio ilgio neapibrėžtis išreiškiama, kaip standartinis nuokrypis, nustatomas skenuotame vaizde, matuojant ilgį (ženklavimo elemento aukštį  $h$  ir plotį  $b$ ),  $s(l_s) = 0,021$  mm.

Kiekvieno taško koordinatės yra gaunamos nustatant ženklavimo elemento padėtį plokštumoje. Tam gauti vaizdai buvo konvertuojami į pilkosios skalės 8-bitų vaizdą. Skaitmeninio vaizdo kalibravimui, toje pačioje plokštumoje, kaip ir deformuojamas bandinys, fiksuojama metalinė liniuotė (padalos vertė 0,5 mm). Paklaida gali atsirasti dėl metalinės liniuotės fizikinių savybių, bei vaizdo konvertavimo metu, lyginant skaitmeninį vaizdą su liniuotės skale. Pradinis ženklavimo elemento ilgis nusakomas pikseliais. Kadangi matavimo vienetai yra maži, liniuotė neturi įtakos skaitmeninio vaizdo kalibravimo neapibrėžčiai. Daroma prielaida, kad reikšminga yra tik vaizdo elementų priskyrimo prie liniuotės  $\Delta_r$  metu atsirandanti paklaida. Ji lygi 0,1 nuo padalos vertės. Ir sudaro didžiausią standartinę neapibrėžtį, kuri lygi 0,29 pikselio. Standartinė neapibrėžtis apskaičiuojama:

$$u(l_\varepsilon) = \frac{\Delta_r}{\sqrt{3}} \quad (3.14)$$

Manoma, kad paklaida dėl didinimo koeficiento įvertinimo yra lygi reikšminio skaičiaus pusei  $\Delta = 0,005$  pikselio. Standartinė neapibrėžtis dėl didinimo koeficiento gali būti apskaičiuota, naudojant stačiakampį pasiskirstymą:

$$u(\alpha) = \pm(\Delta\alpha/\sqrt{3}) = 0,00289 \text{ mm/pixel.}$$

Suminė skaitmeninio vaizdo kalibravimo neapibrėžtis lygi:

$$u(\Delta l_c) = \sqrt{l_\varepsilon^2 \cdot u^2(\alpha) + \alpha^2 u^2(l_\varepsilon)} \quad (3.15)$$

Lygtis  $l = l_\varepsilon \cdot \alpha$  naudojama įtakos koeficientams apskaičiuoti. Atskirų dydžių dalinės išvestinės lygties (iš minėtos lygties):  $\partial l / \partial \alpha = l_\varepsilon = 20,28$  (pikselio);  $\partial l / \partial \varepsilon = \alpha = 0,049$  (mm/pikselio);

Gauso trijų pikselių filtras pritaikomas kaip vaizdų glodinimo funkcija minimizuojant triukšmus skaitmeniniame bandinio vaizde. Vidutinė pilkumo lygio reikšmė 3 x 3 pikselių spinduliu yra pritaikoma kiekvienam vaizdo elementui. Pikselių analizėje gaunama maksimali standartinė neapibrėžtis 0,2 pikselio. Įtakos koeficientas yra lygus  $\alpha = 0,049$  (mm/pikselis).

Visi pateikti absoliutūs įtakos koeficientai apskaičiuoti pagal 3.6 formulę ir lygūs 1.

### 3.1.5.2. Suminės neapibrėžties sandų analizė

Bendra suminė neapibrėžtis nuo ilgio matmens (visų tinklelio ženklavimo elementų plotis  $b$  ir aukštis  $h$  bandinio tempimo metu, kai  $\varepsilon$  svyruoja nuo  $\varepsilon = 0$  % iki  $\varepsilon = 20$  %) yra apibendrinama (3.1.5 lentelėje). Tikimybiniai skirstiniai ir reikšmės

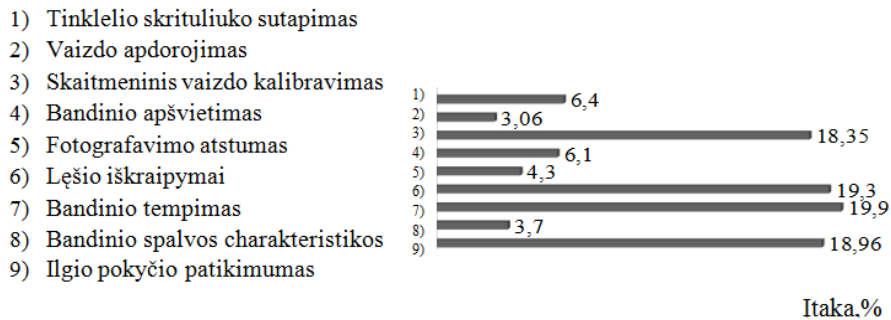
yra priskiriamos, kaip nurodyta 3.1.5 lentelėje. Nuo skirstinio pasirinkimo priklauso parametų parinkimas, galutinio rezultato patikimumas.

Kaip rodo paklaidų vertinimo analizė, didžiausią įtaką bendros neapibrėžties rezultatams darė ilgio parametų atsikartojamumas, bandinio deformacija, *objektyvo iškraipymas* (angl. aberration) ir skaitmeninio vaizdo kalibravimas.

Kaip ir buvo tikėtasi, ilgio pokyčiai lėmė mažas deformacijas, todėl jos gali būti matuojamos su mažesne neapibrėžtimi. Kai atskirus suminės neapibrėžties sandus sudaro mažiau nei 5% suminės standartinės neapibrėžties, į neapibrėžtį gali būti neatsižvelgiama, nes dydis yra nykstamai mažas ir neturi įtakos bendrai suminei neapibrėžčiai. Vis dėlto kai tokių atskirų sandų yra daugiau nei 1, jų bendra vertė gali viršyti 5% suminės standartinės neapibrėžties. Šiuo atveju duomenų apdorojimo, optinės sistemos atstumo įvertinimas, bandinio spalvos charakteristikos, atskirai neviršija 5%. Bet jų verčių suma yra lygi maždaug 11%, todėl negali būti ignoruojami skaičiuojant suminę standartinę neapibrėžtį.

**3.1.5 lentelė.** Suminės neapibrėžties, skirtos matuoti ilgį (ženklinimo tinklelio skrituliukų plotis ir aukštis, kai  $\epsilon=20\%$ ) sudarymas, naudojant skaitmeninių vaizdų analizės metodą

Reikšmė	Simbolis	Standartinė neapibrėžtis		Tipas	Iškraipymai	Jautrumo koeficientas	Kombinuota standartinė neapibrėžtis su jautrumo koeficientu		Laisvės laipsnių skaičius
		Plotis	Aukštis				Plotis	Aukštis	
Ilgio pokyčio patikimumas	$s (\Delta l_\epsilon)$	0,062 (mm)		A	Gauso	1	0,062 (mm)		9
Bandinio spalvos charakteristika	$u (\Delta l_{sc})$	0,012 (mm)		B	Tolygusis	1	0,012 (mm)		$\infty$
Bandinio tempimas	$u (\Delta l_F)$	0,065 (mm)		B	Tolygusis	1	0,065 (mm)		$\infty$
Lęšio iškraipymai	$s (\Delta l_{ab})$	0,063 (mm)		A	Gauso	1	0,063 (mm)		49
Optinės sistemos jautrumas	$u (\Delta l_d)$	0,014 (mm)		B	Tolygusis	1	0,014 (mm)		$\infty$
Bandinio ilgis	$u (\Delta l_r)$	0,02(mm)	0,005(mm)	B	Tolygusis	1	0,02 (mm)	0,005 (mm)	$\infty$
Skaitmeninio vaizdo kalibravimas	$u (\Delta l_c)$	0,06(mm)		B	Tolygusis	1	0,06 (mm)		$\infty$
	$u (l_\epsilon)$	0,29 (pix)		B	Tolygusis	0,049 mm/pix	0,014 (mm)		$\infty$
	$u (\alpha)$	0,0029 (mm/pix)		B	Tolygusis	20,28 pix	0,059 (mm)		$\infty$
Vaizdo apdorojimas	$u (\Delta l_{dp})$	0,2 (pix)		A	Gauso	0,049 mm/pix	0,01 (mm)		$\infty$
Tinklelio skrituliuko sutapimas su skenuoto vaizdo skrituliuku	$s (l_s)$	0,021(mm)		A	Gauso	1	0,021 (mm)		49
Kombinuota standartinė neapibrėžtis							0,13 (mm)		35



**3.15 pav.** Neapibrėžties sandų indėlis suminei neapibrėžčiai

Išplėstinė neapibrėžtis  $U(x)$  (3.15 pav.) buvo apskaičiuojama dauginant bendrą suminę standartinę neapibrėžtį iš Stjudento  $t$  skirstinio 2,03 [134]. Efektyvusis laisvės laipsnių skaičius, reikalingas suminio sklaidos dėsnio koeficientui įvertinti, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$v_{ef} = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^m (W_i u_{x_i})^2 \right\}^2}{\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(W_i u_{x_i})^4}{v_{x_i}} \right\}} \quad (3.16)$$

Išplėstinė neapibrėžtis  $U(x)$ , kai stebimas didžiausias bandinio pailgėjimas ir deformacija siekia 20 %, kiekvienam tinklelio ženklinimo elementui vertinama pagal plotį ir aukštį ir  $U(x) = 0,26$  (mm), rezultatų sklaida gaunama nedidelė ji neviršija 4,5 % pasiklivimo lygmuo lygus 95%.

Neapibrėžties sandų įtaka matavimo rezultatams yra akivaizdi. Suminė standartinė neapibrėžtis priklauso nuo tempimo mašinos kalibravimo, fotoaparato objektyvo techninių parametrų rezultatų. Mažų neapibrėžties sandų ignoravimas, atliekant aptarto vertinimo proceso modeliavimą, gali turėti neigiamos įtakos priimant sprendimus, dėl metodo tinkamumo, matavimo priemonių pasirinkimo ir kt.

### 3.1.6. Ryšys tarp lokalių tempimo ir gniuždymo deformacijų įstrižo vienašio tempimo metu

Vaizdų analizės metodas gali būti taikomas įvairioms kokybės problemoms spręsti. Pritaikius šį metodą, sėkmingai buvo aprašyta laminuotų ir nelaminuotų tekstilės medžiagų elgsena tempiant. Tempiant austinės struktūros medžiagas, kirptas 45° į metmenų sistemą, stebimas formos stabilumo praradimo reiškinys – bandinio suklypimas, kurį sąlygoja tekstilės medžiagos anizotropiškumas, kai atskiros bandinio dalys vienašio tempimo metu pailgėja netolygiai. Labiausiai deformuotoje centrinėje zonoje pasireiškia skirtingos rūšies deformacijos, kurioms

viršijus ribines vertes bandinys centrinėje dalyje išsilanksto suformuodamas raukšlę. Susiformavusi klupimo raukšlė kinta, didėjant tempimo deformacijoms [159-161].

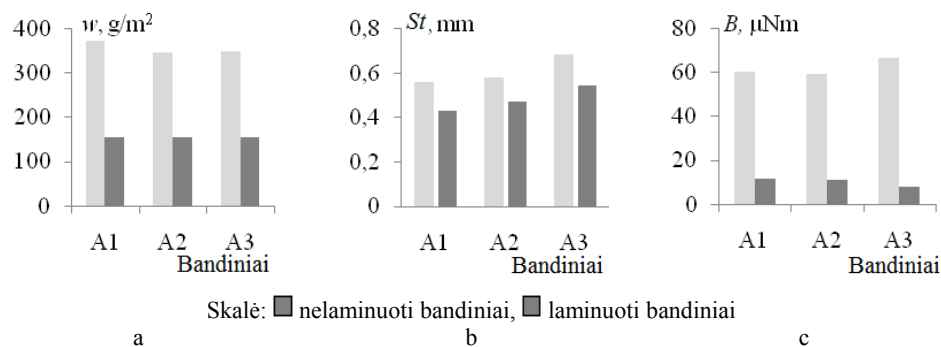
Klupimo reiškiniui bei jo dėšningumams analizuoti užfiksuotuose vaizduose matuojamos bandinio deformacijos išilgine ir skersine kryptimis, analizuojamas susidariusių deformacinių zonų pasiskirstymas.

Ekspertas atliekamas su A grupės drobinio A1, ruoželinio A2 ir 4-nyčio satininio A3 pynimų audiniais. Audinius laminuojant Firstmark plėvele, kurios storis  $105 \div 125$  mikronų, gaunamos dvisluoksnės sistemos (AL1, AL2, AL3) (3.1.6 lent.).

### 3.1.6. lentelė. Laminuotų A1L, AL2 ir AL3 audinių pagrindinės savybės

Charakteristika	Laminuoti audiniai		
	AL1	AL2	AL3
Paviršinis tankis $w$ , g/m <sup>2</sup>	370	346	349
Storis $t$ , mm	0,56	0,58	0,68
Lenkiamasis standis $B$ , μNm	60,0	59,0	66,5

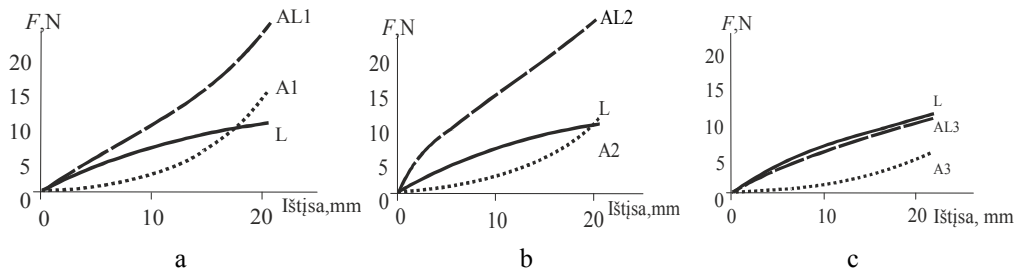
Po laminavimo medžiagos paviršinis tankis  $w$  padidėjo  $2,3 \div 2,4$  kartų, nors medžiagos storis  $t$  santykinai pasikeitė nežymiai  $23,4 \div 30,2$  % ribose (3.1.6 pav.). Laminavimas labiausiai keitė medžiagos paviršinį tankį  $w$  bei lenkiamojo standžio  $B$  rodiklius: drobinio pynimo (A1) ir ruoželinio pynimo (A2) bandiniuose jis išaugo 5 kartus, o mažo standumo bandinyje (A3) 9 kartus [162].



3.16 pav. A1, A2 ir A3 laminuotų ir nelaminuotų bandinių charakteristikų palyginimas: a – paviršinis tankis  $w$ ; b – medžiagos storis  $t$ ; c – lenkiamasis standumas  $B$

Nelaminuotose medžiagose vienašio tempimo metu deformacijos lokalizuojasi centrinėje bandinio dalyje, nes šios medžiagos pasižymi liaunumu bei lankstumu [105]. Laminavimas iš esmės pakeičia deformacinę austų medžiagų elgseną, kur dėl ribojamo siūlų sistemos paslankumo stebimi deformacinės elgsenos pokyčiai. Šie laminuotų ir nelaminuotų medžiagų elgsenos pasikeitimai įgalina vaizdų analizės metodu atlikti deformacinių savybių palyginimą. 3.17 paveiksle pateikiamos pasirinktų audinių (A1, A2, A3), laminavimo plėvelės L ir laminuotų medžiagų (AL1, AL2, AL3) tempimo kreivės  $F - \epsilon$ .



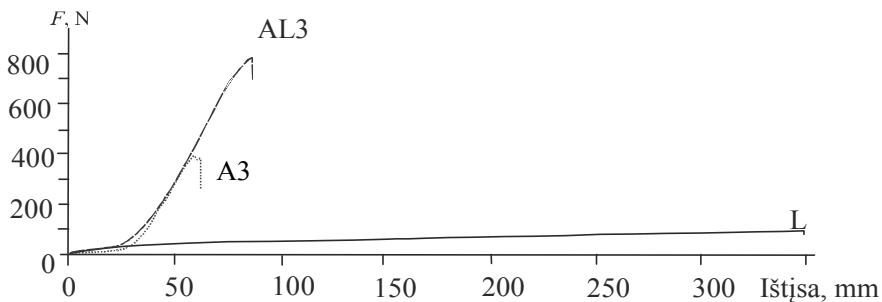


**3.17 pav.** Audinių A1, A2, A3, plėvelės L bei laminuotų audinių AL1, AL2 ir AL3 tempimo kreivės: a – drobinio pynimo bandinys A1, b – ruoželinio pynimo bandinys A2, c – 4-nyčio satininio pynimo audinys A3

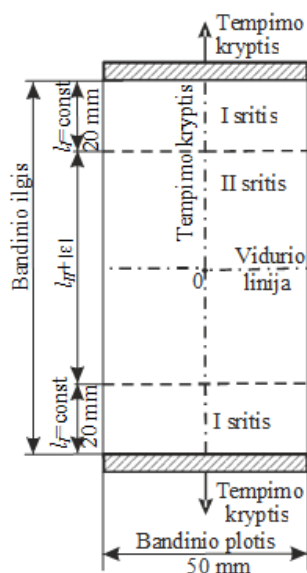
Visais atvejais laminuoti audiniai tapo standesni ir jų tempimo kreivės skyrėsi nuo nelaminuotų audinių, jiems nutraukti prireikė dvigubai didesnės jėgos nei nelaminuotiems bandiniams (3.1.7 lentelė). Laminavus ruoželinio pynimo audinį A2, pakito tempimo kreivės tipas, medžiagos elgsena tapo artimesnė izotropinėms medžiagoms (3.17 pav. b). Laminavimo įtaka 4-nyčiam satininiam audiniui A3 nėra tokia ženkli. Kreivė AL3 mažų įtempių srityje yra panaši į plėvelės L kreivę (3.17 pav. c), tačiau nustačius didžiausią trūkimo jėgą matyti, kad laminatas žymiai sustiprino audinį ir A3L trūksta panašiai kaip ir kiti laminuoti audiniai (3.18 pav. ir 3.1.7. lent.).

**3.1.7. lentelė.** Bandinių A1, A2 ir A3 trūkimo charakteristikos

Bandiniai	A1	AL1	A2	AL2	A3	AL3
Trūkimo jėga, $F_{tr}$ N	437,7	868,5	408,6	790,1	402,3	735,2
Trūkimo ištįsa, $\epsilon_{tr}$ %	54,2	75,7	61,8	86,3	64,4	88,5



**3.18 pav.** Bandinio A3, plėvelės L ir laminuotos sistemos AL3 tempimo kreivės

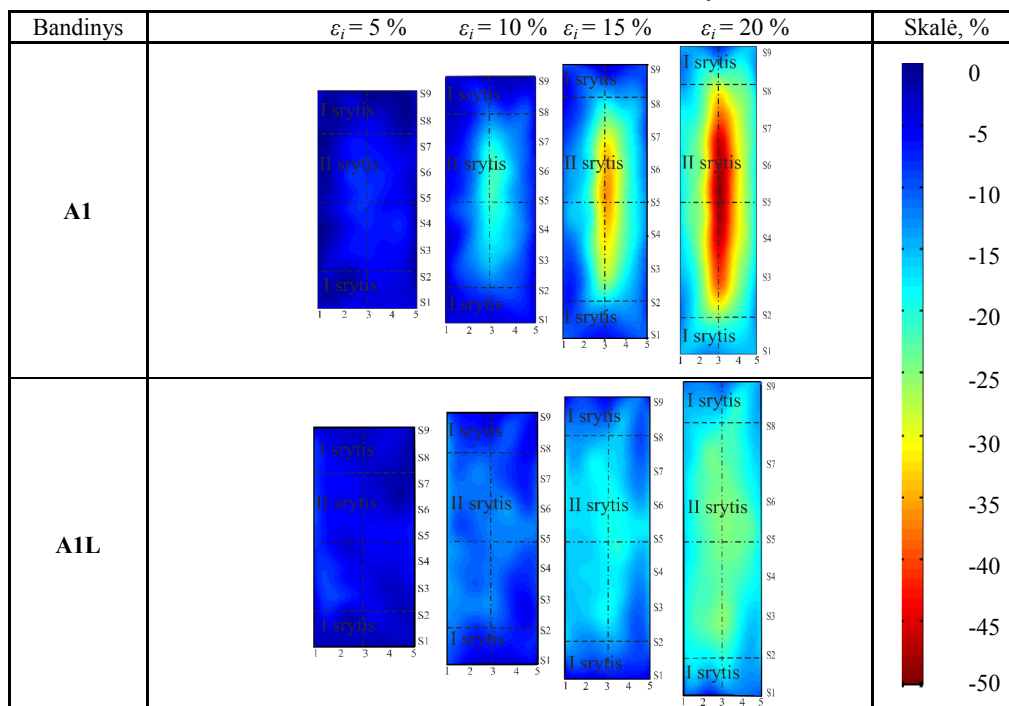


3.19 pav. Bandinio A1 suskirstymas į skirtingai deformuojamas sritis

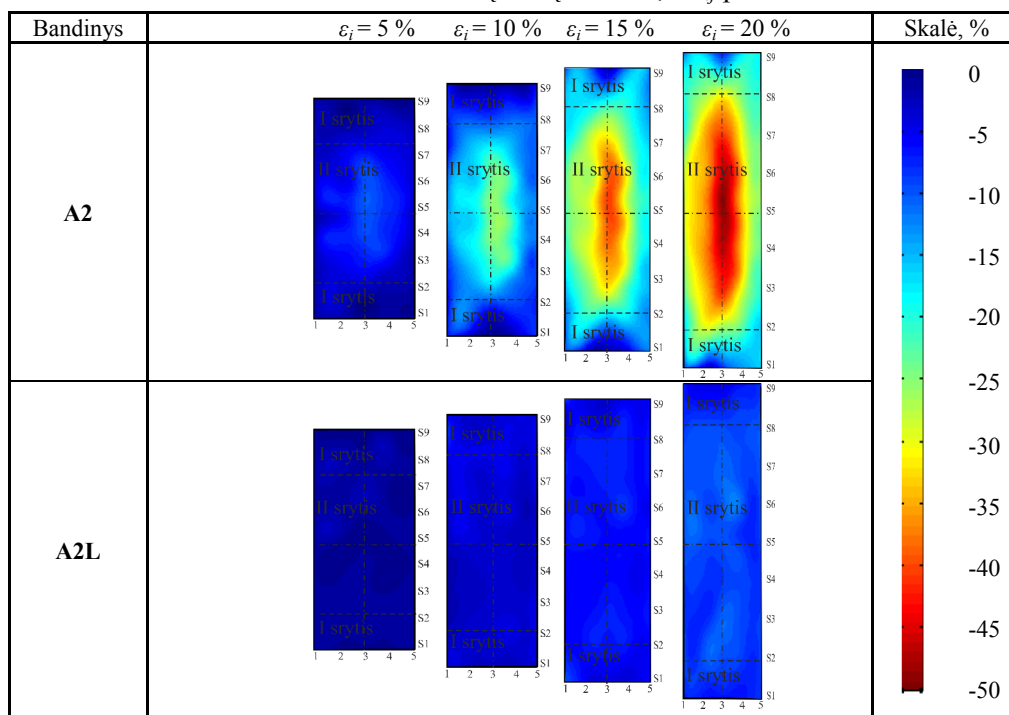
3.1.8 ÷ 3.1.10 lent. pateiktos įstriža kryptimitemptų bandinių A1, A2, A3 ir AL1, AL2, AL3 skrituliukų pločio pokyčio diagramos, ištiesai kintant intervale  $\varepsilon = 5 \div 20 \%$ . Analizuojant gautus rezultatus nustatyta, kad austos struktūros bandiniai dėl jų įtvirtinimo tempimo mašinos spraustuose patiria netolygias skersines ir išilgines deformacijas, kurios pagal veikimo zoną suskirstomos į I ir II sritis (3.19 pav.). I srityje viso deformavimo metu fiksuojami nežymūs pokyčiai, čia bandinys tempimo kryptimi pailgėja 4 % ir dėl gniuždymo susiaureja iki 10 %. Didžiausios deformacijų vertės registruojamos II-os srities centrinėje dalyje.

Jau pradinėje bandinių A1, A2 ir A3 deformavimo stadijoje, kai  $\varepsilon = 5 \%$ , išskiriamos kelios lokalių deformacijų zonos (3.1.8 ÷ 3.1.10 lent.), bandiniuose A1, A2 ir A3 centrinėje dalyje atsiranda koncentruota deformacinė zona. Bandinyje A1 pastaroji labiau koncentruojasi centre, išilgai tempimo ašies, tuo tarpu bandinyje A2 užfiksuota deformacinė zona yra trumpesnė. Labiausiai deformuojamas bandinys A3, kurio deformacinės zonos aukštis panašus kaip ir bandinio A2 atveju, tačiau zona tęsiasi per visą bandinio plotį. Kai audinio ištiesa  $\varepsilon_i = 10 \%$ , II-oje srityje fiksuojamos naujos lokalių deformacijų zonos, bandinys centrinėje srityje skersine kryptimi susiaureja iki 20,7 %, išilgine kryptimi pailgėja iki 15,3 %. Bandinio ištiesai pasiekus  $\varepsilon_i = 15 \%$ , siūlai toliau išilgine kryptimi tempiami plonėja, skersine kryptimi labiau išsirango, sumažėja tarpai tarp siūlų sistemų [152] ir formuojasi naujos tolygiai didėjančios deformacijų koncentravimosi vietos. Bandinio ištiesai pasiekus  $\varepsilon_i = 20 \%$ , lokalias deformacijas išilgine kryptimi pasiekia  $\Delta h_{i20} = 27,4 \%$ , skersine kryptimi  $\Delta b_{i20} = 42,6 \%$ .

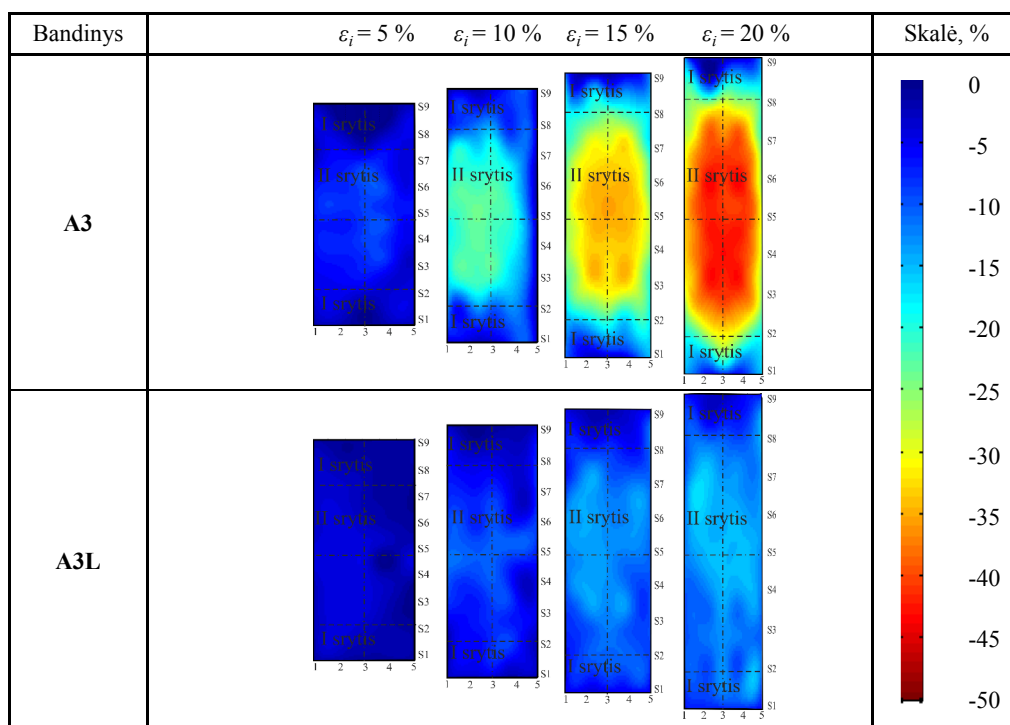
3.1.8 lentelė. Bandinio A1 ir AL1 lokalių zonų vaizdas,  $\Delta b_{ij}$  parametro kitimas



3.1.9 lentelė. Bandinio A2 ir AL2 lokalių zonų vaizdas,  $\Delta b_{ij}$  parametro kitimas



**3.1.10 lentelė.** Bandinio A3 ir AL3 lokalių zonų vaizdas,  $\Delta b_{ij}$  parametro kitimas



Analizuojant maksimalias laminuotų ir nelaminuotų bandinių parametru  $\Delta b_{ij}$  ir  $\Delta h_{ij}$  reikšmes (3.1.11 ir 3.1.12 lent.), pastebime, kad laminavimo įtaka ryškesnė A2 ir A3 tipo bandiniuose. Siūlų perdangų ilgis didesnis ruoželinio (A2) bei 4-nyčio satininio (A3) pynimo audiniuose, kas sąlygoja mažiau stabilią struktūrą nei drobinio pynimo bandinyje (A1). Laminavimo proceso metu audinys dubliuojamas su polimerinė danga. Tokiu būdu medžiagos struktūra stabilizuojama, iš dalies apribojamas metmenų ir ataudų siūlų paslankumas. Bandinyje A3 deformacija skersine kryptimi vidutiniškai sumažėjo 2,5 kartus, o bandinyje A2 – 4 kartus, atitinkamai išilgine kryptimi bandinyje A2 – 1,6 karto, bandinyje A3 1,3 karto. Bandiniuose A1 ženklinimo tinklelio elementų pločio pokytis  $\Delta b$  sumažėjo iki 2,0 kartų, o aukščio pokytis buvo mažesnis -  $\Delta h$  mažėjo iki 1,1 karto.

**3.1.11 lentelė.** Maksimalios  $\Delta b_{ij}$  parametru vertės

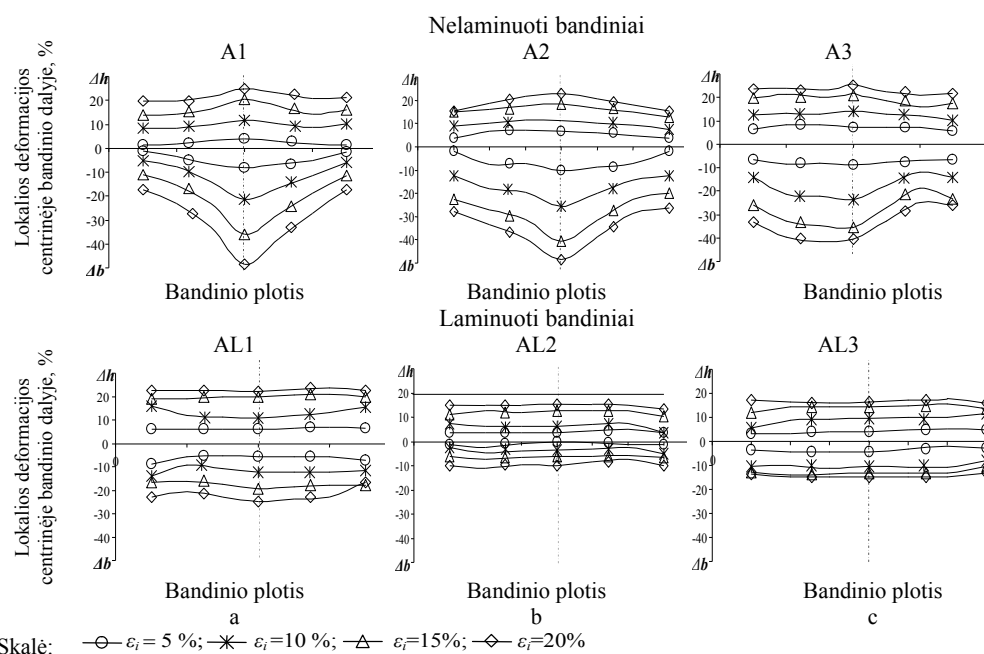
Žymėjimas	$\Delta b_{5\ max}, \%$		$\Delta b_{10\ max}, \%$		$\Delta b_{15\ max}, \%$		$\Delta b_{20\ max}, \%$	
	Nelaminuoti bandiniai	Laminuoti bandiniai	Nelaminuoti bandiniai	Laminuoti bandiniai	Nelaminuoti bandiniai	Laminuoti bandiniai	Nelaminuoti bandiniai	Laminuoti bandiniai
A1	-8,3	-5,8	-21,5	-14,4	-36,2	-19,4	-48,5	-24,7
A2	-10,2	-2,5	-25,5	-4,9	-40,6	-7,3	-48,6	-11,1
A3	-9,9	-4,2	-23,7	-1,7	-35,6	-14,0	-43,1	-14,9

### 3.1.12 lentelė. Maksimalios $\Delta h_{ij}$ parametrų vertės

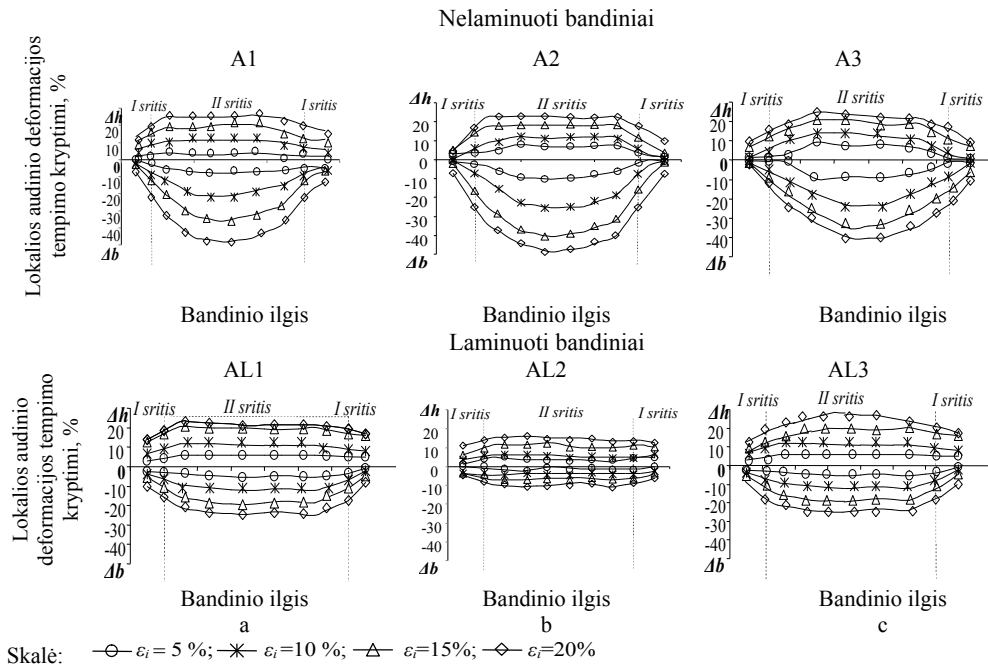
Žymėjimas	$\Delta h_{5\max}$ , %		$\Delta h_{10\max}$ , %		$\Delta h_{15\max}$ , %		$\Delta h_{20\max}$ , %	
	Nelaminuoti bandiniai	Laminuoti bandiniai	Nelaminuoti bandiniai	Laminuoti bandiniai	Nelaminuoti bandiniai	Laminuoti bandiniai	Nelaminuoti bandiniai	Laminuoti bandiniai
A1	3,8	8,3	11,5	12,4	20,4	21,5	26,0	23,7
A2	7,9	5,0	13,3	7,6	18,9	12,6	23,0	16,0
A3	9,1	6,6	13,9	11,9	20,9	16,6	24,8	20,5

Taigi, laminavimo įtaka didesnė skersiniams tempiamų bandinių matmenims, todėl laminuoti bandiniai ištiesai pasiekus maksimalią ribą  $\varepsilon_I = 20\%$  nesusiraukšlėja, kai bandiniuose A1, A2 klupimo raukšlė nelaminuotose bandiniuose pradeda formuotis bandiniui pailgėjus  $10 \div 12\%$ , o bandiniui A3 -  $14\%$ .

Siekiant palyginti laminuoto ir nelaminuoto audinio bandinių deformavimo pobūdį tempimo metu, centrinėmis x ir y deformacijų kryptimis kiekviename bandinio pailgėjimo etape braižomos lokalių deformacijų diagramos pagal ženklinimo tinklelio elementų geometrinių matmenų pokyčius  $\Delta b_{ij}$  ir  $\Delta h_{ij}$ . Bandinių A1, A2 ir A3 diagramos pateikiamos 3.20 ir 3.21 paveiksluose.



**3.20 pav.** Maksimalios deformacijos bandinio centrinėje linijoje: a – A1 ir AL1; b – A2 ir AL2; c – A3 ir AL3

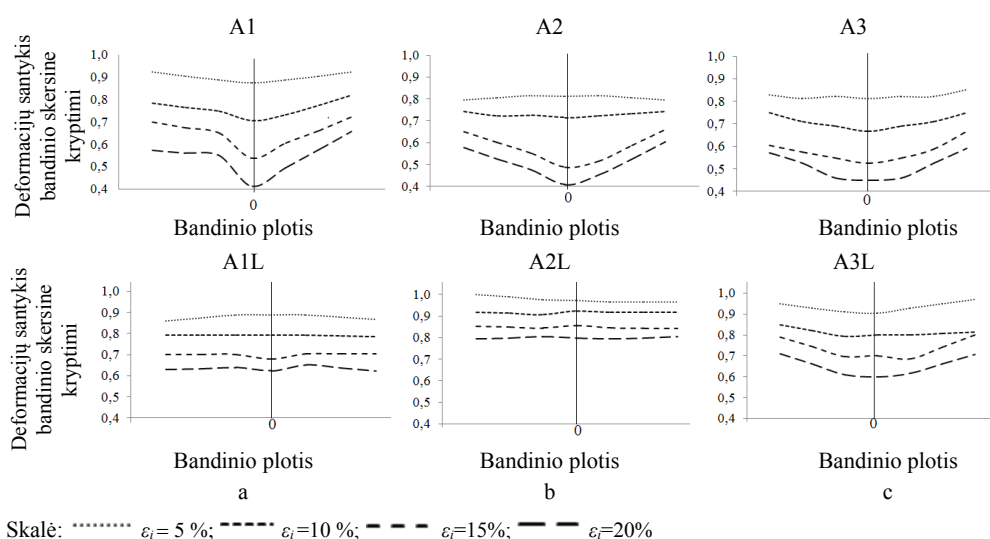


**3.21 pav.** Maksimalios įstrižo bandinio deformacijos tempimo kryptimi: a – A1 ir AL1; b – A2 ir AL2; c – A3 ir AL3

Nelaminuotose medžiagose didėjant audinio ištiesai  $\epsilon$ , bandinio plotyje  $\Delta h_{ij}$  kinta nežymiai, visose tirtose bandinių grupėse didžiausios  $\Delta h_{ij}$  vertės fiksuojamos bandinio centrinėje dalyje (3.21 pav. a, b, c).  $\Delta b_{ij}$  kitimas lyginant su  $\Delta h_{ij}$  yra ryškesnis centrinėje bandinio dalyje: bandiniuose A1 ir A2 fiksuojamos didžiausios deformacijų vertės, bandinyje A3 deformacijos pasiskirsto per visą bandinio plotį. Ši tendencija stebima ir lokalių zonų pasiskirstymo diagramose (3.1.10 lentelė). Panašios tendencijos išlieka ir analizuojant atsiradusias deformacijas bandinio tempimo kryptimi. Stebint tų pačių rodiklių kitimą laminuotose medžiagose, matyti ryški laminavimo įtaka medžiagų elgsenai: tiek  $\Delta b$ , tiek  $\Delta h$  vertės buvo stabilizuotos ir kito neženkliai, neišryškėja kreivių smailės bandinio centre – atsiskleidžia teigiama laminavimo įtaka audinių formos stabilumui, kai įstrižai tempiami laminuoti bandiniai nesiraukšlėja.

Pradinėje tempimo stadijoje tekstilės bandinių skersiniai ir išilginiai matmenys patiria proporcingas deformacijas, bandinys išlaiko pastovią formą ir nesuklumpa. Didėjant bandinio ištiesai  $\epsilon$ , skersiniai matmenys centrinėje bandinio dalyje kinta greičiau nei bandinio matmenys išilgine (tempimo) kryptimi, lokalių deformacijų kreivėse išryškėja deformacijų smailės 3.20 ir 3.21 pav. Tempiamų bandinių  $\Delta h > 0$ , o skersiniai matmenys mažėja  $\Delta b < 0$  dėl bandinio siaurėjimo. Taigi, kai bandinio gniuždymo kryptimi atsiranda didesnės deformacijos nei tempimo kryptimi, viršijamos deformacijų proporcingumo ribos, fiksuojami priešingo ženklo įtempiai,

bei tenkinama nelygybė  $\Delta b > \Delta h$ , dėl to deformuojamo bandinio centrinėje dalyje susidaro klupimo raukšlės [163].



**3.22 pav.** Skersinių ir išilginių deformacijų santykio kitimas centrinėje bandinio linijoje: a – A1 ir AL1; b – A2 ir AL2; c – A3 ir AL3

Norint įvertinti bandinio skersines ir išilgines deformacijas, kiekviename jo pailgėjimo etape skaičiuojamas vidurio linijoje esančių ženklavimo tinklelio elementų skersinių ir išilginių deformacijų santykis  $\sigma = b_{ij} / h_{ij}$  (3.22 pav.). Pradinėje deformavimo stadijoje, kai  $\varepsilon = 5\%$ , bandiniuose A1, A2 ir A3  $\sigma$  kinta  $0,8 \div 0,9$  ribose, kai tuo tarpu laminuotuose bandiniuose AL1, AL2 ir AL3  $\sigma$  kinta  $0,9 \div 1,0$  ribose. Austos struktūros bandiniuose pradeda ryškėti netolygios skersinės ir išilginės deformacijos. Deformacijos bandinio centrinėje dalyje yra šiek tiek didesnės nei deformacijos, fiksuojamos bandinio kraštuose. Kai tuo tarpu laminuotuose bandiniuose AL1 ir AL2 deformacijos visame bandinio plote pasiskirsto tolygiai. Iš laminuotų bandinių grupės galima išskirti audinį AL3, pastarasis pasižymėjo dideliu liaunumu, todėl bandiniuose stebimas nežymus deformacijų netolygumo padidėjimas centrinėje bandinio dalyje. Ištiesai pasiekus  $\varepsilon = 10\%$  austos struktūros bandiniuose deformacija  $\sigma$  kinta  $0,7 \div 0,8$  ribose, išlieka ta pati tendencija, ypatingai pasireiškianti bandinio centrinėje dalyje. Po laminavimo visame bandinio plote pasireiškia tolygus deformavimosi procesas. Austuose bandiniuose  $\varepsilon$  pasiekus  $15\%$  stebimas deformacijų šuolis ( $\sigma$  kinta nuo  $0,5$  iki  $0,7$ ), centrinėje dalyje atsiranda deformacinių kreivių smailės, kas sąlygoja bandinio formos stabilumo praradimą. Laminuotuose bandiniuose AL1 ir AL2 vis dar stebimas tolygus deformavimasis, bandinyje AL3 stebimas nežymus deformacijų netolygumas,  $\sigma$  kinta  $0,80 \div 0,70$  ribose. Bandinio ištiesai pasiekus  $\varepsilon_i = 20\%$ , austos struktūros bandiniuose skersinių ir išilginių deformacijų santykis svyruoja  $0,4 \div 0,6$  ribose, toliau centrinėje bandinio dalyje ryškėja deformacinių kreivių smailės, kas

rodo netolygią austos struktūros bandinių elgseną vienašio tempimo metu. Laminuotuose bandiniuose nestebimas deformacijų šuolis, bandinyje AL3 išlieka nežymus deformacijų netolygumas –  $\sigma$  kinta  $0,70 \div 0,60$  ribose, tačiau ir šiuose bandiniuose nestebimi deformacinių kreivių smailės. Tai rodo sumažėjusį deformuojamų laminuotų bandinių siūlų judėjimą. Taigi, austos struktūros bandiniuose pasireiškiantis deformacijų netolygumas gali būti analizuojamas deformacinių kreivių pagalba. Deformacijų santykio kreivėse didėjant bandinio ištiesai stebimas bandinio formos stabilumo praradimo reiškinys, kuris gali būti įvertinamas skaitinėmis vertėmis. Pastebėta, kad deformacijų santykiui  $\sigma$  centrinėje dalyje viršijus bandinio kraštuose fiksuojamą santykį daugiau kaip 0,2, fiksuojamas tempiamo bandinio balanso praradimas. Laminuotuose bandiniuose nestebimas deformacijų šuolis, neišryškėja deformacinių kreivių smailės. Nors tendencija mažiau būdinga liaunos struktūros bandiniui A3, tačiau iš  $\sigma$  kreivių matyti, kad po laminavimo šie bandiniai tapo stabilesni.

Atliekant laminuotų ir nelaminuotų audinių palyginimą, akivaizdu, kad laminavimas pakeitė tiriamų bandinių elgseną. Zonos tapo labiau išsklaidytos visame bandinio plote ir nestebima deformacinių zonų koncentracija centrinėje bandinio dalyje. Laminavimas labiau paveikė deformacijų skersine kryptimi kitimą, centrinėje dalyje deformacijos A1 bandinio atveju sumažėjo 49 %, A2 80 %, A3 58 %, o išilgine kryptimi atitinkamai A1 – 10 %, A2 – 34 %, A3 – 21 %. Taigi, laminavimo įtaka didesnė bandinių skersinių matmenų pasikeitimui.



## 4. VAIZDŲ ANALIZĖS METODO TAIKYMAS TEKSTILĖS MEDŽIAGŲ TYRIMUI IR VERTINIMUI

### 4.1 Dildymo įtakos audinio kokybei nustatymas vaizdų analizės metodu

Analizuojant tekstilės medžiagų deformavimosi eigą, dažniausiai atsižvelgiama į jos gebėjimą nekisti dėl įvairių išorinių veiksnių įtakos [2]. Vaizdų analizės metodai leidžia išsamiau įvertinti medžiagos kokybę atsižvelgiant į austos struktūros medžiagų vidinius deformavimosi procesus, pašaliniais veiksniais nedarant įtakos deformavimosi procesams.

#### 4.1.1 Dildymo poveikis stiprumui ir lokalioms deformacijoms tempiant

Klasikinėje medžiagotyroje medžiagų stiprumas nusakomas tempimo jėgos  $F_{max}$  ir ištiesos  $\varepsilon_{max}$  rodikliais. Dildymo metu pažeistų audinių mechaninė elgsena skiriasi [164]. Tempimo kreivių  $F$ - $\varepsilon$  pobūdis priklauso nuo bandinio pažeidimo laipsnio: kuo labiau pažeidžiamas bandinių paviršius, tuo bandiniui nutraukti prireikia mažesnės jėgos (žr. į 4.1 ir 4.2 lent.).

**4.1 lentelė.** Dildytų bandinių trūkimo jėga  $F$  metmenų kryptimi

Bandiniai Abrazyvo Nr.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
40	703,0	648,0	546,4	-*	685,3	534,9	516,5	-*
120	695,4	514,1	317,6	-*	550,4	553,1	437,0	313,5
280	750,2	637,5	441,5	77,3	556,1	730,3	410,9	722,3
600	877,0	689,0	463,2	365,6	657,0	760,4	396,8	879,7
1500	946,8	700,0	670,0	380,9	691,1	830,5	383,6	888,7
2500	1226,0	994,1	810,9	403,5	1035,4	849,7	727,9	889,3
Kontrolinis	1348,8	1010,5	811,7	426,5	1110,4	865,3	740,4	887,0

\* Pastaba: dildymo metu bandiniai suiro iki skylių

**4.2 lentelė.** Dildytų bandinių trūkimo jėga  $F$  ataudų kryptimi

Bandiniai Abrazyvo Nr.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
40	425,0	551,0	457,6	-*	482,9	373,1	582,5	-*
120	374,8	579,5	361,2	-*	560,3	450,0	802,6	-*
280	401,5	569,5	386,2	223,8	611,8	576,3	858,3	439,0
600	372,4	572,3	583,0	270,4	604,3	597,3	760,5	714,5
1500	377,0	582,3	697,0	305,2	572,5	584,8	830,7	737,3
2500	374,8	604,5	709,5	308,3	588,3	600,4	873,0	737,9
Kontrolinis	414,5	601,7	731,8	341,6	609,3	617,8	889,3	737,8

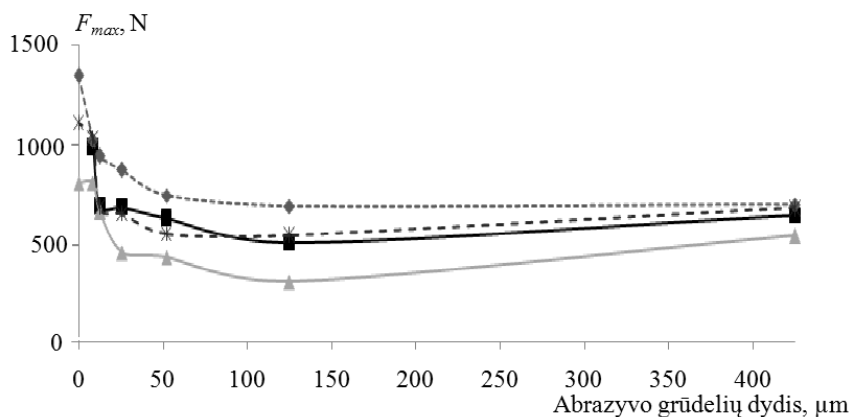
\* Pastaba: dildymo metu bandiniai suiro iki skylių

Atlikus dildytų bandinių trūkimo jėgos  $F$  analizę pastebėta, kad labiausiai bandinių paviršius pažeidžiamas juos dildant Nr. 40 ir Nr. 120 abrazyvais. C1, C2,

C3, C5, C7 ir C8. Metmenų kryptimi kirptuose bandiniuose didžiausias stiprumo sumažėjimas fiksuojamas, kai pastarieji dildomi Nr. 120 abrazyvu. Bandinių grupė C6 išsiskyrė iš kitų bandinių, čia didžiausias stiprumo sumažėjimas pastebimas, kai bandiniai dildomi abrazyvu Nr. 40. Ataudų kryptimi kirptuose bandiniuose po dildymo pasireiškė panašus stiprumo sumažėjimo pobūdis, C1 ir C3 bandinių grupėse didžiausias stiprumo sumažėjimas fiksuojamas, kai bandiniai dildomi abrazyvu Nr. 120, o bandiniai C2, C5, C6, C7 dildomi Nr. 40 abrazyvais. Tai galime paaiškinti tuo, jog dildymo metu skyrėsi tiriamų audinių pluoštinė sudėtis, audinių paviršinis tankis, pynimo tipas, siūlų tankumas metmenų bei ataudų kryptimis, taip pat daroma prielaida, kad audinių suirimui įtakos turėjo abrazyvo akmenėlių kontaktinis plotas su dildomo audinio atraminiu paviršiumi, tokiu būdu ir didžiausi pažeidimai dildant atsiranda prie skirtingo numerio abrazyvų.

Dildymo metu pažeidžiami siūlų pluošteliai, o dalis jų tiesiog nubyra. Metmenų ir ataudų kryptimis pažeistų siūlo pluoštelių kiekiai skyrėsi, tai turėjo įtakos ataudų kryptimi kirptų bandinių didesniai stiprumo mažėjimui. Iš visos tirtų bandinių grupės mažiausiu stiprumu pasižymėjo bandiniai C4, pastarieji buvo mažiausio paviršinio tankio bei storio (2.5 lent.). Didžiausiomis stiprumo savybėmis pasižymėjo bandinių grupė C1.

Nustačius tirtų audinių maksimalias tempimo jėgas ir nubraižius trūkimo jėgos priklausomybės nuo abrazyvo grūdėlio dydžio kreives (4.1 pav.) pastebime, kad bandiniai, dildyti Nr. 2500 abrazyvais, neprarado stiprumo:  $F_{max}$  tempimo jėga kontrolinių nedildytų ir dildytų Nr. 2500 abrazyvu kito 5 % ribose.

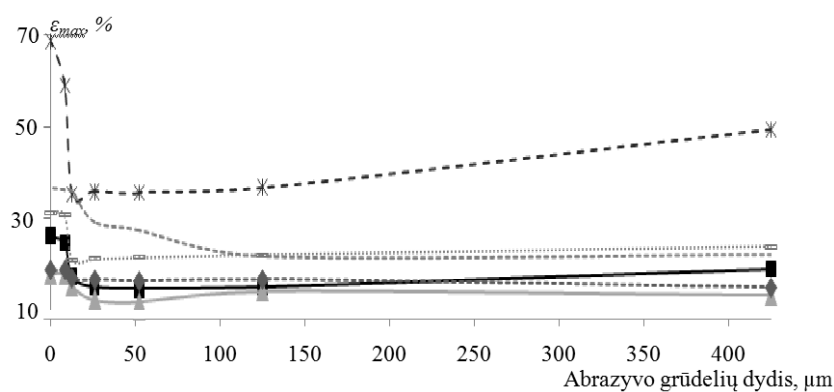


Skalė: C1 ----○; C2 —■; C3 —▲; C5—\*—; C6—●—

4.1 pav. Trūkimo jėgos priklausomybė nuo abrazyvo grūdėtumo, metmenų kryptis

Vienašio tempimo metu analizuojamos maksimalios deformuojamų bandinių pailgėjimo vertės  $\epsilon_{max}$  (4.3 ir 4.4 lent.). C5 bandinys pasiekė didžiausias pailgėjimo vertes metmenų ir ataudų kryptimis. Pastebime, kad dvisluksniai (laminuoti, dengti) bandiniai C4 ÷ C8 pasižymėjo didesnėmis  $\epsilon_{max}$  vertėmis, nei vienasluksniai bandiniai C1 ÷ C3. Laminuotų bei dengtų bandinių pailgėjimui įtakos turėjo abi

tekstilės medžiagos sistemos, tekstilinis pagrindas bei polimerinė danga. Tekstilės medžiaga pasižymėjo anizotropškumu, o polimerinė danga homogeniškumu, pastarųjų deformacinės savybės nepriklauso nuo tempimo krypties [165 – 167].



Skalė: C1 ----; C2 —■; C3 —▲; C4 —×; C5 —\*—; C6 —●; C7 .....; C8 ——

**4.2 pav.** Bandinių trūkimo ištisos priklausomybė nuo abrazyvo grūdėtumo, metmenų kryptis

**4.3 lentelė.** Maksimalus bandinių pailgėjimas  $\epsilon_{max}$ , metmenų kryptimi

Bandiniai Abrazyvo Nr.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
40	-*	18,86	13,11	-*	49,19	21,97	23,83	-*
120	-*	14,95	13,98	-*	36,70	21,69	21,92	17,55
280	-*	14,50	11,80	12,00	35,45	27,50	21,43	21,43
600	-*	14,93	12,21	24,50	35,70	29,25	21,03	24,29
1500	-*	17,25	15,03	24,65	35,09	35,98	20,98	24,44
2500	-*	24,47	17,81	29,57	58,80	36,16	30,68	24,49
Kontrolinis	-*	26,09	17,80	29,74	68,51	36,72	31,21	24,69

\* Pastaba: dildymo metu bandiniai suiro iki skylių

**4.4 lentelė.** Maksimalus bandinių pailgėjimas  $\epsilon_{max}$  ataudų kryptis

Bandiniai Abrazyvo Nr.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
40	15,00	26,39	20,80	-*	35,57	23,91	31,97	-*
120	16,70	27,20	17,40	-*	39,48	25,43	37,27	-*
280	16,41	26,15	16,22	21,15	43,63	35,36	39,38	33,40
600	16,63	26,20	21,90	25,75	44,51	36,92	39,52	33,40
1500	16,89	27,06	25,45	26,87	44,97	37,49	39,94	33,78
2500	18,70	28,27	26,23	29,49	46,28	38,68	41,05	34,03
Nedildytas	18,55	28,24	26,59	32,31	49,81	38,68	41,78	34,62

\* Pastaba: dildymo metu bandiniai suiro iki skylių

Dildymo metu keičiasi  $\varepsilon_{max}$  pailgėjimo vertės (4.2 pav.). Bandinius dildant stambaus grūdėtumo Nr. 40, 120 ir 280 abrazyvais, bandinių ištįsa trūkstant  $\varepsilon_{max}$  labai sumažėja, tačiau pastebima, kad bandinius dildant smulkaus grūdėtumo Nr. 600, 1500 ir 2500 abrazyvais, ištįsos  $\varepsilon_{max}$  vertės palaipsniui išauga ir tampa artimos nedildyto bandinio vertėms. Šių bandinių atveju stebimas nežymus ištįsos pasikeitimas, kuris svyravo 10 % ribose. Siekiant giliau išanalizuoti dildymo metu pažeidžiamo audinio paviršiaus pokyčius, pažeidimų įtaką bandinių ištįsai bei stiprumui, atliekami tolimesni tyrimai vaizdų analizės metodu pagalba.

Tiriant tekstilės medžiagų mechanines savybes, ieškoma priklausomybė tarp medžiagų mechaninių parametrų, tiriamos veikiančios jėgos bei deformacijos. Deformacijų matavimas vaizdų analizės pagalba leido nustatyti lokalias bandinio deformavimosi zonas (4.7 lent.), o lokalių deformacijų vertės padėjo tiksliau aprašyti dildymo metu pažeistų bandinių elgseną.

**4.5 lentelė.** Aukščio pokyčio  $\Delta h$  vidutinės vertės

Bandinys	$\Delta h$ 5 vid, %		$\Delta h$ 10 vid, %		$\Delta h$ 15 vid, %		$\Delta h$ 20 vid, %	
	$\Delta h_{D^*}$	$\Delta h_{N^*}$	$\Delta h_{D^*}$	$\Delta h_{N^*}$	$\Delta h_{D^*}$	$\Delta h_{N^*}$	$\Delta h_{D^*}$	$\Delta h_{N^*}$
C2	2,3	2,5	7,2	5,9	12,1	8,9	16,4	14,8
C3	2,6	3,5	7,1	8,6	11,7	13,0	15,7	17,3
C4	3,8	4,1	7,7	11,7	14,3	16,2	19,6	20,3
C5	1,5	1,5	5,4	5,7	9,5	8,8	13,2	10,2
C6	2,5	2,7	7,8	8,3	14,5	14,74	17,8	18,4
C7	4,3	4,8	6,7	6,9	10,5	10,8	14,4	13,4
C8	3,0	4,4	8,3	8,3	13,3	14,2	18,3	18,6

\* Pastaba: D – dildytas bandinys, N – nedildytas (kontrolinis) bandinys

**4.6 lentelė.** Pločio pokyčio  $\Delta b$  vidutinės vertės

Bandinys	$\Delta b$ 5 vid, %		$\Delta b$ 10 vid, %		$\Delta b$ 15 vid, %		$\Delta b$ 20 vid, %	
	$\Delta b_{D^*}$	$\Delta b_{N^*}$	$\Delta b_{D^*}$	$\Delta b_{N^*}$	$\Delta b_{D^*}$	$\Delta b_{N^*}$	$\Delta b_{D^*}$	$\Delta b_{N^*}$
C2	-4,4	-3,4	-17,2	-17,2	-26,2	-27,8	-31,2	-32,1
C3	-3,3	-2,6	-14,5	-14,7	-22,6	-23,3	-28,3	-28,6
C4	-4,5	-3,5	-10,4	-9,4	-13,1	-13,9	-16,4	-15,8
C5	-4,3	-3,2	-9,4	-8,9	-18,2	-16,6	-23,3	-22,2
C6	-6,8	-6,6	-13,6	-11,8	-28,9	-28,2	-35,7	-35,7
C7	-9,8	-9,3	-9,1	-9,1	-14,6	-13,0	-20,1	-20,0
C8	-8,7	-7,8	-22,4	-21,0	-33,0	-32,7	-39,5	-39,5

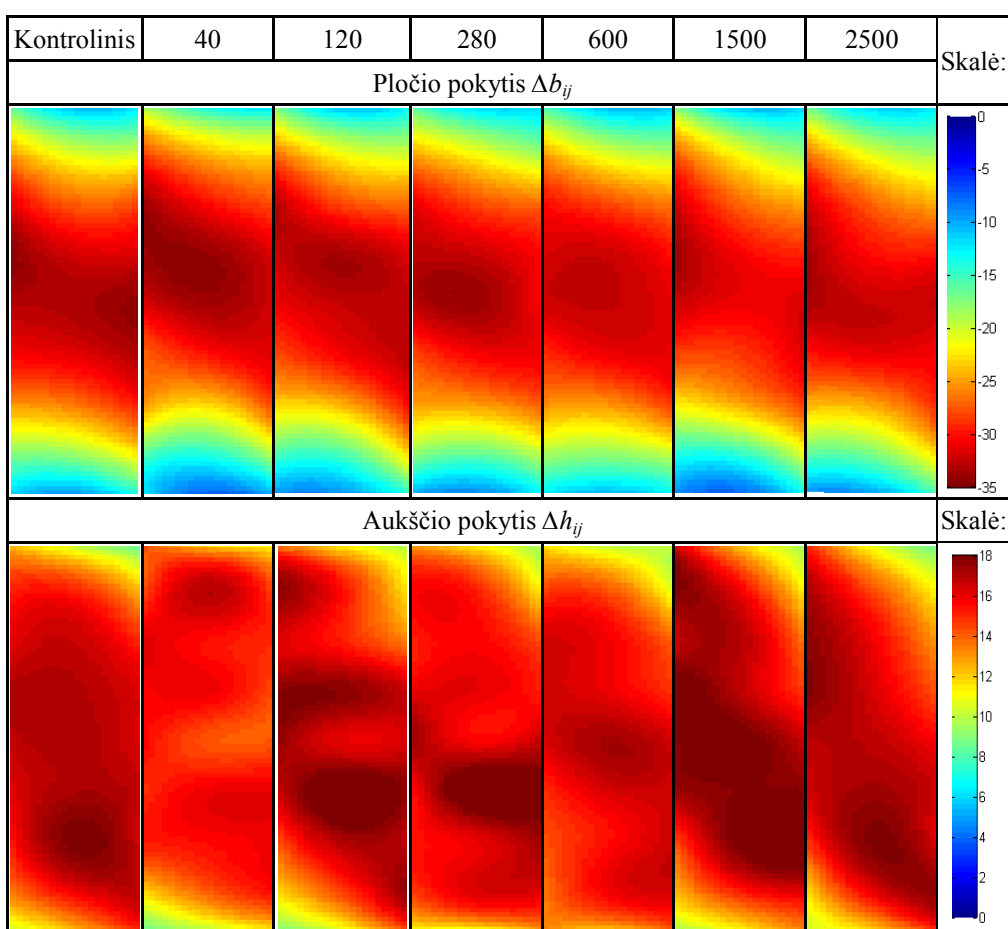
\* Pastaba: D – dildytas bandinys, N – nedildytas (kontrolinis) bandinys

Nagrinėjant vidutines įstrižų bandinių pločio pokyčio  $\Delta b_{ij}$  (4.5 lent.) ir aukščio pokyčio  $\Delta h_{ij}$  (4.6 lent.) rodiklių vertes, pastebime, kaip bandinių deformacinei elgsenai įtakos turėjo dildymo procesas. Lyginant dildytų bandinių aukščio pokyčio  $\Delta h_{ij}$  rodiklius su pločio pokyčio rodikliais  $\Delta b_{ij}$ , matome, kad neženkliai pasikeitė skersinių ir išilginių deformacijų santykis. Dildymo įtaka labiau pastebima  $\Delta b_{ij}$

rodiklio vertėms, bandinio deformacijai pasiekus 5 %, fiksuojamas staigus tempiamo bandinio pločio pasikeitimas: bandiniuose C2, C3, C4 ir C5 pasikeitimai svyravo 28 ÷ 34 % ribose, o bandiniuose C6, C7 kito mažiau 3 ÷ 5 %. Labiausiai dildymo metu pažeidžiamas bandinys C3, šio bandinio  $\Delta b_{ij}$  pločio pokytis pasikeitė 28 %, o aukščio pokytis  $\Delta h_{ij}$  25 %. Šie matmenų pasikeitimai turėjo įtakos jėgų persiskirstymui bandinyje.

Nustatyta, kad tempiant dildytus bandinius persiskirsto vidinės jėgos, tai atspindi lokalių deformacijų diagramos (4.7 lent.). Bandinių gniuždymo kryptimi fiksuojami didesni deformacijų pokyčiai,  $\Delta b_{ij}$  kito iki 35 %, o tempimo kryptimi  $\Delta h_{ij}$  iki 18 %. Kontrolinių bandinių centrinėje dalyje lokali deformacija išsidėsto ištisinėmis linijomis, o dildytuose bandiniuose stebimi deformacijų netolygumai, pasireiškiantys centrinės, labiausiai deformuojamos zonos iškraipymais. Gniuždymo bei tempimo kryptimi atsirandantys deformacijų netolygumai mažėja mažėjant abrazyvo šiurkštumui. Galime pastebėti, kad apie deformacinius procesus lengviau spręsti iš lokalių deformacijų diagramų nei iš  $\Delta h_{ij}$  ir  $\Delta b_{ij}$  vidutinių skaitinių verčių.

**4.7 lentelė.** Bandinio C2 lokalių deformacijų vaizdai, kai  $\varepsilon = 20 \%$

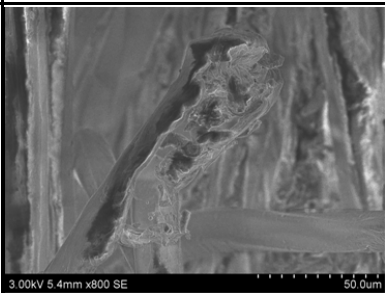
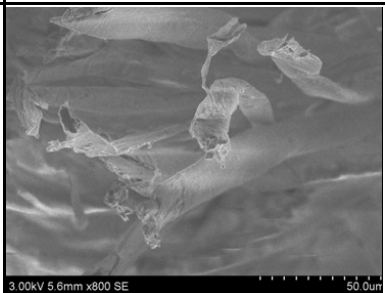
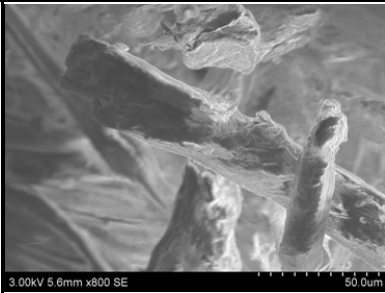

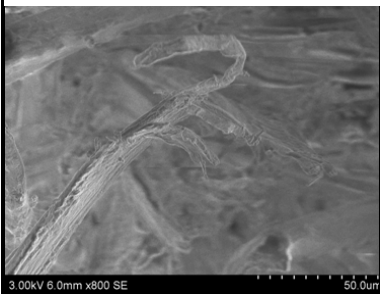
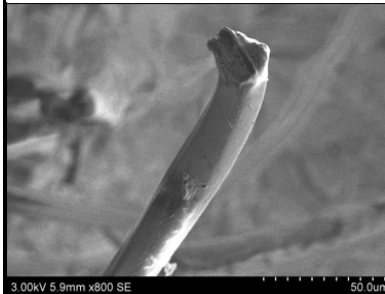


Taigi, dildymas padarė įtaką audinių mechaninėms savybėms, todėl pakito deformacinė bandinių elgsena. Vaizdų analizės metodas leido tiksliau įvertinti pažeistų tekstilės bandinių deformacinę elgseną, nustatyti maksimalių deformacijų koncentravimosi vietas.

#### 4.1.2 Tekstilės paviršiaus defektų tyrimas vaizdų analizės pagalba












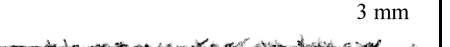









Skirtingo numerio abrazyvais dildytų bandinių paviršiaus pažeidimų vizualinis vertinimas atliekamas mikroskopu. Pastebėta, kad dildymo metu metmenų ir ataudų kryptimi kirpti audiniai pažeidžiami skirtingai. Dildymo įtaka labiau pastebima ataudų krypties bandiniuose, kai bandiniai dildomi Nr. 40, 120 ir 280 abrazyvais. Tuomet, kai bandiniai dildomi Nr. 600, 1500 ir 2500 abrazyvais, pažeidimų skaičius sumažėja, mechaniškai paviršius pažeidžiamas nežymiai, tačiau išryškėja kita uniforminiams drabužiams būdinga problema – tekstilės audinio paviršiaus vietinio pobūdžio blizgesys.

4.8 lentelė. Elektroniniu skenuojančiu mikroskopu 800 kartų išdidintas bandinys C1

Arbazyvo Nr.	Metmenų kryptis	Arbazyvo Nr.	Metmenų kryptis
40		600	
120		1500	
280		2500	

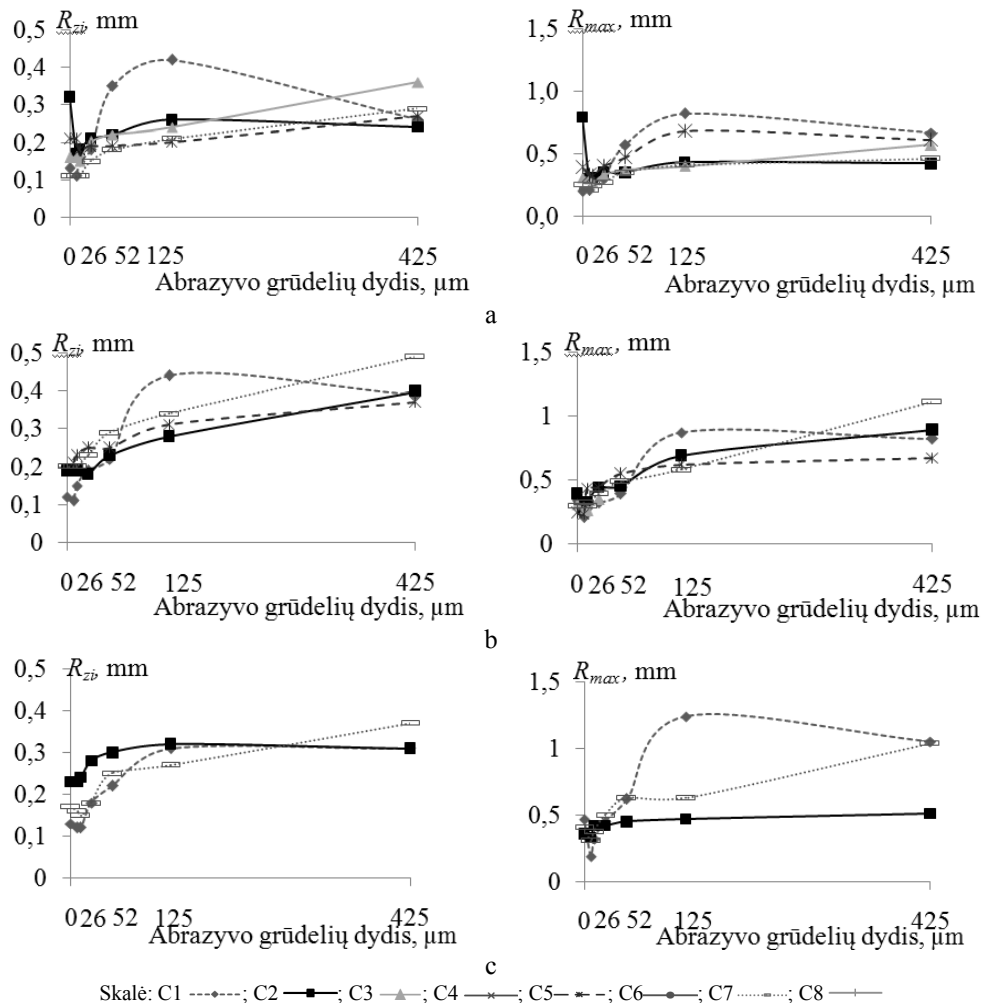
Pažeistą bandinių paviršių apžiūrėjus padidintą 800 kartų (4.8 lent.), pastebime, kad dildymo metu siūlai pažeidžiami nevienodai, nupjovimo pobūdis keičiasi, keičiantis abrazyvo grūdelio dydžiui. Bandiniuose, dildytuose griežto dildymo sąlygomis Nr. 40 ir Nr. 120 abrazyvais, siūlai nukertami. Bandiniuose, dildytuose Nr. 280, 600 abrazyvais, audinio siūlai nukertami palaipsniui, per keletą dildymo ciklų: abrazyvo akmenėlis pirmiausia pažeidžia atskiras siūlo pluoštų dalis, o galiausiai nutraukia siūlą. Bandiniuose, dildytuose Nr. 1500 ir 2500 abrazyvais, bandiniai pažeidžiami minimaliai, nupjaunami siūlų kiekis mažas (4.9 lentelė), pastebimas nupjautų siūlo viršūnių užapvalėjimas.

4.9 lentelė. Skirtingais abrazyvais dildyto bandinio C1 rezultatai

Abrazyvo Nr.	Įstriža kryptis		Ataudų kryptis		Metmenų kryptis	
Kontrolinis						
	$R_z$ 0,11	$R_{max}$ 0,47	$R_z$ 0,12	$R_{max}$ 0,34	$R_z$ 0,13	$R_{max}$ 0,20
40						
	$R_z$ 0,11	$R_{max}$ 1,05	$R_z$ 0,39	$R_{max}$ 0,82	$R_z$ 0,26	$R_{max}$ 0,67
120						
	$R_z$ 0,58	$R_{max}$ 1,24	$R_z$ 0,44	$R_{max}$ 0,87	$R_z$ 0,42	$R_{max}$ 0,82
280						
	$R_z$ 0,32	$R_{max}$ 0,62	$R_z$ 0,22	$R_{max}$ 0,39	$R_z$ 0,35	$R_{max}$ 0,57
600						
	$R_z$ 0,19	$R_{max}$ 0,45	$R_z$ 0,19	$R_{max}$ 0,32	$R_z$ 0,18	$R_{max}$ 0,30
1500						
	$R_z$ 0,14	$R_{max}$ 0,32	$R_z$ 0,15	$R_{max}$ 0,28	$R_z$ 0,15	$R_{max}$ 0,30
2500						
	$R_z$ 0,12	$R_{max}$ 0,19	$R_z$ 0,11	$R_{max}$ 0,21	$R_z$ 0,12	$R_{max}$ 0,21



Atliekant dildytų bandinių plokštuminių vaizdų analizę nepilnai nustatomas bandinių suirimo pobūdis, negalime pilnai įvertinti paviršinio sluoksnio pažeidimo laipsnio, todėl atliekama dildymo zonos paviršiaus nelygumo profilogramų analizė. Dildyto bandinio vaizduose išmatuojamas vidutinis profilio mikronelygumų aukštis  $Z_b$ , apskaičiuojamas vidutinis mikronelygumų aukštis  $R_{zi}$  ir didžiausias profilio mikronelygumų aukštis  $R_{max}$  (4.9 lent.).



**4.3 pav.** Dildytų bandinių: a – metmenų kryptis; b – ataudų kryptis; c – įstriža kryptis

Mažėjant mikrogrūdelių skersmeniui, mažėjo bandinių storis ir išsikišusių plaukelių aukštis (4.9 lent.). Ilgiausias išsikišusių plaukelių  $R_{max}$  ilgis gautas ataudų ir įstriža kryptimis kirptuose bandiniuose, kai dildomi Nr.40 ir 120 abrazyvais, rezultatai svyravo  $0,49 \div 1,24$  mm ribose (4.3 pav.), vidutinis išsikišusių plaukelių aukštis svyravo  $R_z = 0,20 \div 0,49$  mm ribose. Šiomis kryptimis dildomi bandiniai pažeidžiami labiausiai, nes padidėja abrazyvo akmenėlių ir audinio siūlų kontaktinių

susilietimo taškų kiekis. Mažiausios  $R_z$  vertės gautos bandinius dildant Nr. 2500 abrazyvu, gauti  $R_z$  rezultatai svyravo  $0,08 \div 0,23$  mm,  $R_{max}$   $0,11 \div 0,37$  mm ribose. Mažiausi  $R_{zi}$  ir  $R_{max}$  svyravimai pasireiškė ploniausiame bandinyje C4,  $R_{zi}$  siekė  $0,08 \div 0,14$  mm, o  $R_{max}$   $0,12 \div 0,28$  mm. Šis bandinys metmenų ir ataudų kryptimis buvo tankiausias, tai lėmė, kad dildymo metu patiriamos apkrovos išsiskirstė visame deformuojamame plote, todėl ir pažeidimai tapo mažesni. Didžiausi  $R_{zi}$  ir  $R_{max}$  svyravimai pasireiškė bandiniuose C1 ir C8,  $R_{zi}$  bandinyje C1 kito nuo 0,11 mm iki 0,40 mm, bandinyje C8 kito nuo 0,11 mm iki 0,49 mm,  $R_{max}$  bandinyje C1 kito nuo 0,20 mm iki 1,24 mm, bandinyje C8 kito nuo 0,24 mm iki 1,11 mm. Bandinys C1 savo sudėtyje turėjo medvilnės, tai lėmė didesnę abrazyvo grūdelių ardantį poveikį, o bandinys C8 pasižymėjo mažiausiu tankumu, todėl abrazyvo akmenėliai kliuvo už austos sistemos siūlų ir greitai suardė austą struktūrą dildymo zonoje.

Išanalizavus 4.3 paveikslą galime pastebėti, kad iš vienasluosnių audinių grupės išsiskiria bandinys C1 – jame, kitaip nei bandiniuose C2 ir C3, metmenų ir ataudų kryptimis stebimi didesni struktūriniai pažeidimai dildant Nr. 120 abrazyvu. Bandinį C3 dildant Nr. 40, 120 ir 280 abrazyvais ataudų ir įstriža kryptimis, dėl atlasiniam pynimui būdingų ilgų perdangų stebimas visiškas dildomo paviršiaus suirimas. Dengtų, ir laminuotų bandinių grupėje (C4, C6 ir C8) visomis kryptimis dildyti Nr. 40 ir 120 abrazyvais bandiniai suiro iki skylių (4.10 lent.). Iš 4.3 paveikslą galime pastebėti, kad bandinius dildant Nr. 1500 ir 2500 abrazyvais, mažėja išsikišusių plaukelių skaičius. Nr. 2500 abrazyvo atveju rodiklis tapo mažesnis, negu kontroliniuose bandiniuose, nes tokio dildymo metu audinio paviršiuje esantys siūlai suspaudžiami, nubyra išsikišę siūlo pluoštai, tačiau nauji pluoštai nepažeidžiami, tai keičia liaunos medžiagos vizualines paviršiaus savybės, dėl to paviršius dildymo zonoje pradeda blizgėti.

**4.10 lentelė.** Bandinių  $R_{zi}$  vertės, kai jie dildyti Nr. 1500 ir 2500 abrazyvais

Bandiniai	Įstriža kryptis			Ataudų kryptis			Metmenų kryptis		
	Kontrolinis	1500	2500	Kontrolinis	1500	2500	Kontrolinis	1500	2500
C1	0,13	0,12	0,12	0,12	0,15	0,11	0,13	0,15	0,11
C2	0,23	0,24	0,23	0,19	0,19	0,19	0,23	0,18	0,17
C3	0,21	0,20	0,21	0,19	0,20	0,19	0,16	0,15	0,16
C4	0,08	0,07	0,08	0,08	0,09	0,08	0,08	0,09	0,08
C5	0,21	0,23	0,21	0,21	0,23	0,21	0,21	0,18	0,21
C6	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10
C7	0,17	0,15	0,16	0,20	0,20	0,20	0,11	0,11	0,11
C8	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11	0,10	0,15	0,12	0,14

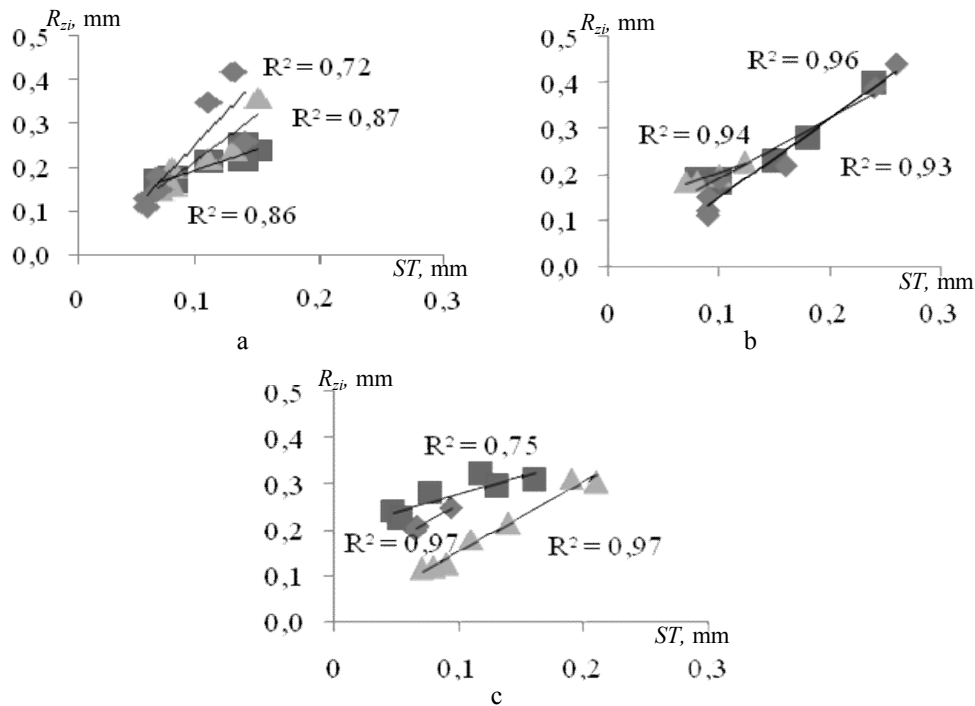
**4.11 lentelė.** Bandinių  $R_{maxi}$  vertės, kai jie dildyti Nr. 1500 ir 2500 abrazyvais

Bandiniai	Įstriža kryptis			Ataudų kryptis			Metmenų kryptis		
	Kontrolinis	1500	2500	Kontrolinis	1500	2500	Kontrolinis	1500	2500
C1	0,47	0,32	0,19	0,34	0,28	0,21	0,2	0,3	0,21
C2	0,36	0,42	0,33	0,32	0,32	0,28	0,79	0,31	0,3
C3	0,4	0,31	0,37	0,31	0,26	0,26	0,31	0,27	0,3
C4	0,12	0,13	0,11	0,12	0,13	0,12	0,12	0,13	0,12
C5	0,28	0,32	0,31	0,24	0,43	0,23	0,39	0,32	0,33
C6*	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C7	0,41	0,38	0,31	0,3	0,3	0,32	0,25	0,24	0,21
C8*	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\* Pastaba: dildymo metu bandiniai suiro iki skylių

Skirtingos tekstilės medžiagų savybės turi įtakos skirtingai tekstilės medžiagų elgsenai jų eksploatacijos ciklo metu. Tai gerai pademonstruoja rodikliai  $R_{zi}$  ir  $R_{max}$ .  $R_{max}$  rodiklis už  $R_{zi}$  didesnis nuo 1,10 iki 2,82 karto. Atliekant tekstilės audiniuose nublizgimo susidarymo sąlygas analizuojami bandiniai dildyti Nr. 1500 ir Nr. 2500 abrazyvais. Iš 4.10 ir 4.11 lentelių pastebime, kad bandinius dildant Nr. 1500 abrazyvu  $R_{zi}$  reikšmių skirtumai svyruoja nuo 0 iki 25 %. Didžiausi svyravimai stebimi bandinyje C1, kur ataudų kryptimi užfiksuotas 25 %  $R_{zi}$  reikšmės padidėjimas, bandiniuose C2 ÷ C8 stebimas mažesnis  $R_{zi}$  verčių augimas pastarasis siekia iki 14 %. Kai bandiniai dildomi Nr. 2500 abrazyvu bandinių C3 ÷ C6  $R_{zi}$  verčių skirtumai susilygina su nedildytų bandinių  $R_{zi}$  vertėmis, o bandinių C1 ÷ C2 ir C7 ÷ C8 atvejais  $R_{zi}$  vertės sumažėja nuo 0 ÷ 8,7% ribose, pastarieji bandiniai dildymo zonoje suplonėja, čia nubyra išsikišę siūlo pluoštai.

Atliekant  $R_{maxi}$  rodiklių analizę, turime išskirti C6 ir C8 grupės bandinius, šiuose bandiniuose  $R_{maxi}$  rodiklių vertės lygios nuliui, kadangi bandiniai sudaryti iš sintetinių siūlų, juose nepastebimas siūlo pluoštų išsikišimas, kituose bandiniuose pastebimas  $R_{maxi}$  verčių tolygus mažėjimas išskyrus bandinius C2 (įstrižas bandinys, dildomas Nr. 1500 abrazyvu), C4 (dildomas Nr. 1500 abrazyvu, visomis kryptimis) ir C5 (ataudų ir įstriža kryptys, dildomas Nr. 1500 abrazyvu), šiuose bandiniuose pastebimas nežymus  $R_{maxi}$  verčių didėjimas lyginant su nedildytų bandinių vertėmis. Galime pastebėti, kad bandinius dildant Nr. 1500 ir 2500 abrazyvais minimaliai pažeidžiamas paviršius, bandiniai dildymo metu nesuardomi, tačiau pasikeičia paviršiaus glotnumas, atsiranda vietinio pobūdžio blizgesys, šis defektas dažną kartą stebimas darbinuose, uniforminiuose drabužiuose. Sudaryta vaizdų analizės metodika, tinkama įvertinti paviršiaus netolygumą, gali padėti prognozuoti gaminių iš tekstilės elgseną jų dėvėjimo metu.



Skalė: C1 ◆; C2 ■; C3 ▲;

**4.4 pav.** Bandinių rodiklio  $R_{zi}$  priklausomybė nuo paviršinio storio  $ST$ : a – metmenų kryptis; b – ataudų kryptis; c – įstriža kryptis

Palyginus vaizdų analizės metodu nustatytą rodiklį  $R_{zi}$  ir paviršinio storio  $ST$  rodiklį vienasluoksniuose audiniuose C1 ÷ C3, nustatyta stipri tiesinė rodiklio  $R_{zi}$  priklausomybė nuo bandinio paviršinio storio  $ST$  (4.4 pav.), ji svyruoja nuo 0,72 iki 0,97. Gauta, kad mechanškai paveiktos zonos paviršinio storio pokytis ir rodiklis  $R_{zi}$  yra panašūs, todėl galima teigti, jog vaizdų analizės metodas tinkamas dildomo paviršiaus kokybei vertinti, bandinio pažeidimams fiksuoti ir analizuoti.

#### 4.2 Kompozitų deformacinės elgsenos analizavimas vaizdų analizės metodu

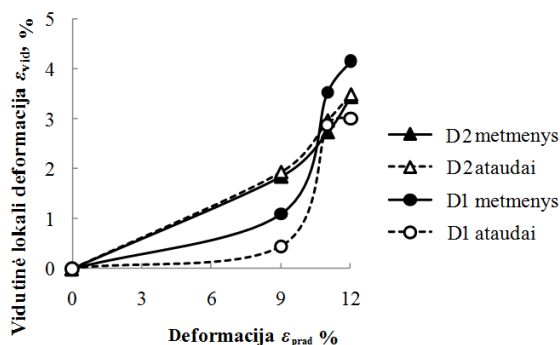
Išskirtinis tekstilės medžiagų formuojamumas aktualus ne tik aprangoje, bet ir techninės paskirties gaminiuose, tokiuose, kaip tekstile armuoti kompozitai. Kaip rodo literatūros apžvalga, norint užtikrinti geresnes kompozitų mechanines savybes, galima taikyti pradinio tempimo metodą [116, 122], kurio metu tekstilės gaminiai yra deformuojami ir suteikus reikiamą erdvinę formą užfiksuojami. Gaminių kokybė priklauso ne tik nuo medžiagos elgsenos formavimo metu, bet ir gaminių elgsenos jų vartojimo metu, todėl šioje dalyje vaizdų analizės pagalba analizuojamos audinio deformacijos formavimo bei suteikus gaminiui reikiamą formą metu.

Šiam tyrimui pasirinkti žinomų mechaninių charakteristikų D grupės bandiniai (2.6 lentelė), kuriems buvo nustatyta skirtinga pradinio įtempimo  $\epsilon_{\text{prad}}$  įtaka. Lokalių deformacijų kitimas pradinio įtempimo metu pateiktas 4.6 ir 4.7 paveiksluose.

Pastebime, kad ženkliai didesnės lokalių deformacijų vertės gaunamos metmenų kryptimi nei ataudų [114]. Čia deformacijų koncentracijos zonoje esantys pluoštai patiria didesnius įtempius, nei likusiose bandinio dalyse, todėl pasiekus pluoštų stiprumo ribą, gaunamas pirmalaikis irimas. Tai patvirtina ir kitų mokslininkų darbai [120], kuriuose dėl netolygaus įtempių ir deformacijų pasiskirstymo nustatytos prastesnės mechaninės savybės. Galima teigti, kad dėl didesnės lokalių deformacijų koncentracijos metmenų kryptimi, gaunama mažesnė tempimo įtaka kompozito savybėms šia kryptimi. Tačiau iš vidutinių lokalių deformacijų kitimo grafiko (4.5 pav.) matyti, kad vidutinės metmenų ir ataudų kryptimis nustatytos vertės skiriasi neženkliai, o audinio D2 atveju yra vienodos. Šie rezultatai patvirtina, kad vidutinė audinio elgsena dažnai neatsipindi pokyčių vykstančių audinio viduje, dėl to nepavyksta nustatyti ir defektų susidarymo priežasčių.

**4.12 lentelė.** Lokalių deformacijų netolygumo kitimas tempimo metu

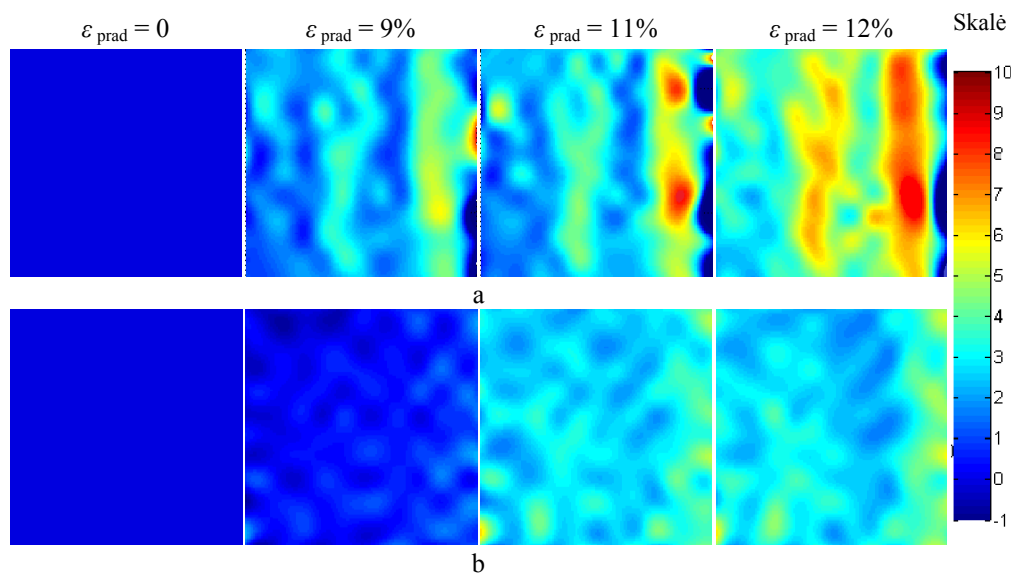
Pradinė deformacija, %	D1		D2	
	metmenys	ataudai	metmenys	ataudai
0	0	0	0	0
9	1,21	0,51	0,69	0,93
11	1,35	0,66	1,09	0,91
12	1,42	0,81	1,30	0,96



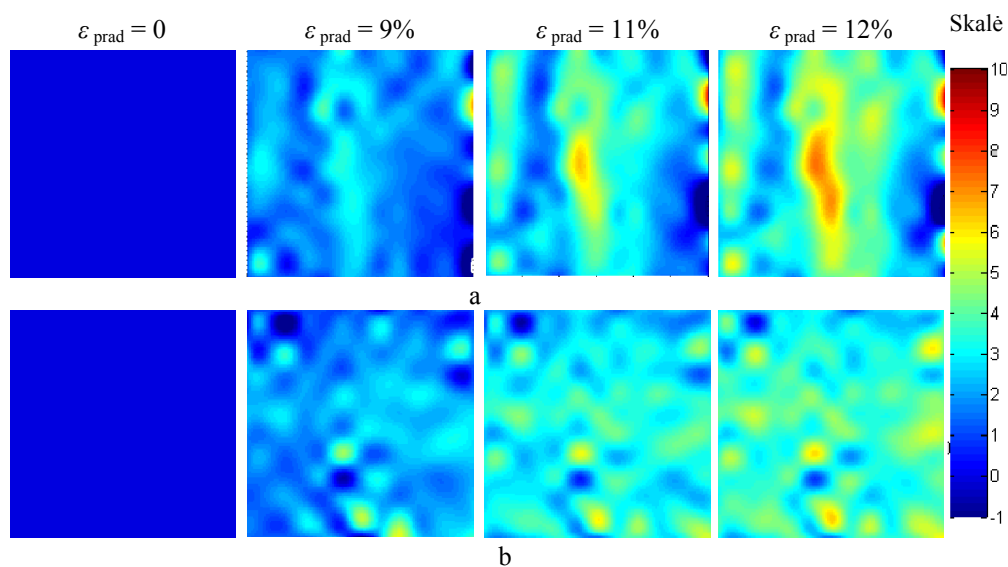
**4.5 pav.** Vidutinės lokalių deformacijos priklausomybė nuo pradinės deformacijos

Analizuoiant tyrimo rezultatus, pastebėti skirtumai audinių D1 ir D2 deformacinėje elgsenoje. Iš 4.6 ir 4.7 paveiksluose pateiktų duomenų matyti, kad lokalių deformacijų skirtumai metmenų ir ataudų kryptimis didesni audinyje D1 nei D2. Audinyje D1 vidutinės lokalių deformacijų vertės yra artimos, tuo tarpu audinyje D1 metmenų kryptimi gautos iki 28% didesnės už vidutinės lokalias deformacijas nei ataudų (4.5 pav.). Lokalių deformacijų tolygumas abiejuose audiniuose taip pat ženkliai skyrėsi; jeigu D2 audinyje deformacijų netolygumas

bandinį tempiant buvo artimų verčių abejomis audinio kryptimis, tai D1 metmenų kryptimi lokalių defomacijų netolygumas buvo apytikriai du kartus didesnis ir didėjant deformacijai nuosekliai didėjo. Tai rodo, kad audiniui D1 būdinga didesnė savybių anizotropija skirtingomis audinio kryptimis, kurią galima paaiškinti skirtinga metmenų ir ataudų siūlų sistemų sandara.

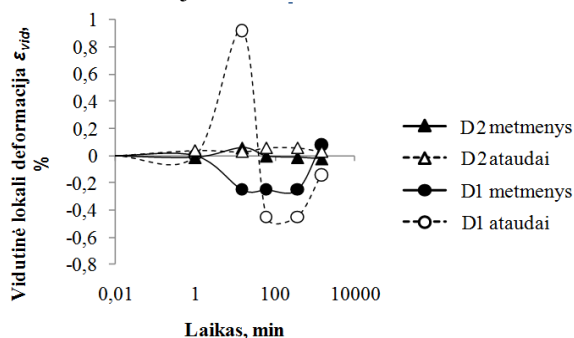


4.6 pav. Lokalių deformacijų pasiskirstymas audinyje D1 (a) metmenų ir (b) ataudų kryptimis tempimo metu



4.7 pav. Lokalių deformacijų pasiskirstymas audinyje D2 (a) metmenų ir (b) ataudų kryptimis tempimo metu

Metmenų siūlių ilginis tankis yra didesnis nei ataudų, tuo tarpu siūlų tankumai skiriasi nedaug, todėl metmenų siūlų sistema yra ženkliai stipresnė nei ataudų. Kadangi audinio D1 skirtumai tarp metmenų ir ataudų yra didesni nei audinio D2, todėl tempiant audinį D1 gaunama netgi didesnė įtempių ir deformacijų koncentracija metmenų kryptimi nei audinio D2 atveju. Todėl audiniu D1 armuotam kompozitui pradinis tempimas turėjo mažesnę, arba netgi neigiamą įtaką. Metmenų kryptimi kompozitas didžiausias stiprio vertes pasiekė netaikant arba taikant tik nedidelę 9% deformaciją ir didesnes – 9-11% deformacijos vertes ataudų kryptimi. O audiniu D2 armuotas kompozitas didžiausias stiprio vertes abiem kryptimis pasiekė taikant 11 ir 12% deformacijos vertes.



4.8 pav. Vidutinės lokali deformacijos kitimas kompozito stingimo metu

Kompozitų bandinių be pradinės deformacijos relaksacinė elgsena stingstant pateikta 4.8 paveiksle. Matyti, kad audinyje D2 kompozitui stingstant beveik nevyksta lokalių deformacijų kitimas, tuo tarpu anizotropiniame audinyje D1 praėjus maždaug 30 min po suvilgymo derva, bandinys metmenų kryptimi traukiasi ir ilgėja ataudų kryptimi. Šie pokyčiai vyksta dėl skirtingos audinių reakcijos į poveikį drėgmei. Tačiau prasidėjus dervos polimerizacijai ir stingimui bandinys visiškai pakeičia savo elgseną ir registruojamos neigiamos lokalių deformacijų vertės abiem kryptimis. Tačiau kompozitui stingstant bandinio vidutinės lokali deformacijos tolygiai mažėja ir besibaigiant polimerizacijos procesui, t.y. praėjus 24 h, abiejų audinių atveju yra visai neženklios.

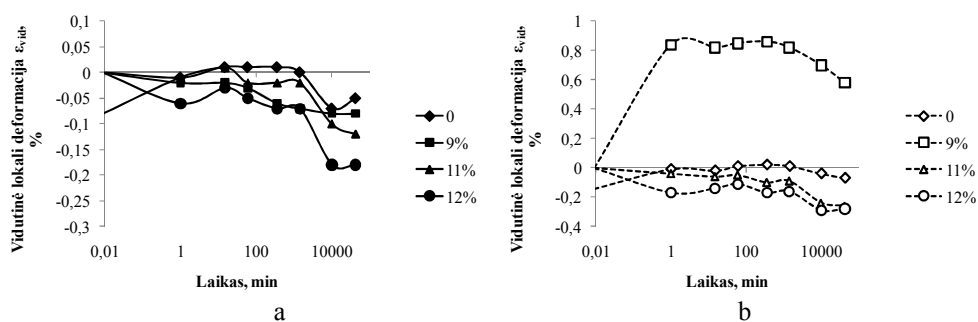
4.13 lentelė. Lokalių deformacijų netolygumo kitimas armuotame kompozite relaksacinio proceso metu bandinys D1

Laikas, min	metmenys				ataudai			
	0	9%	11%	12%	0	9%	11%	12%
1	0,27	0,22	0,45	0,24	0,21	0,79	0,47	0,38
15	0,18	0,22	0,38	0,26	0,19	0,82	0,46	0,45
60	0,24	0,22	0,38	0,26	0,21	0,83	0,47	0,50
360	0,33	0,48	0,40	0,27	0,40	0,80	0,47	0,54
1440	0,26	0,23	0,40	0,27	0,22	0,77	0,48	0,65
10080	0,35	0,44	0,31	0,34	0,33	0,85	0,41	0,51
43200	0,46	0,50	0,39	0,30	0,36	1,01	0,48	0,53

**4.14 lentelė.** Lokalių deformacijų netolygumo kitimas audiniu D2 armuotame kompozite relaksacinio proceso metu

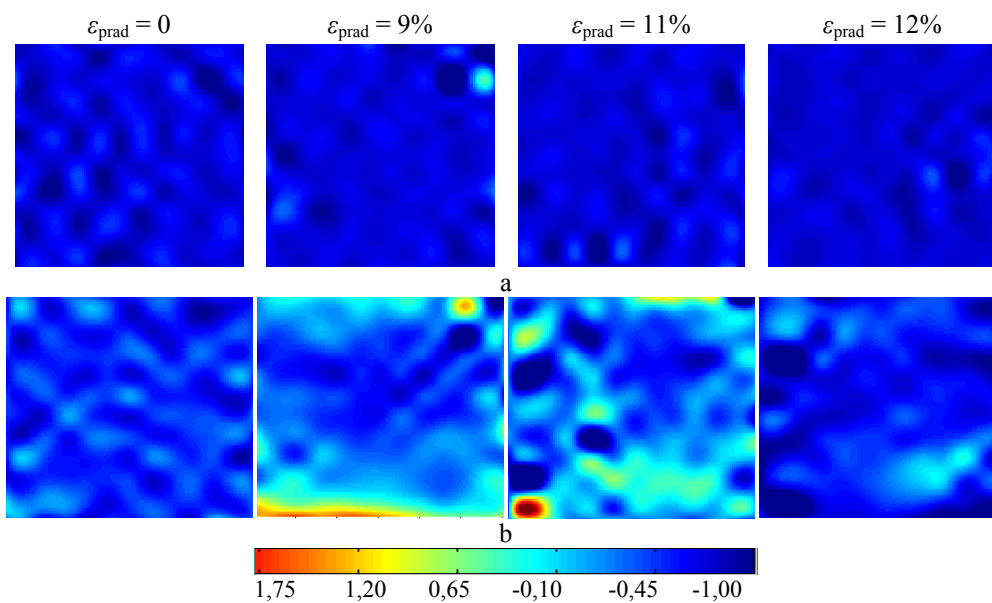
Laikas, min	metmenys				ataudai			
	0	9%	11%	12%	0	9%	11%	12%
1	0,36	0,21	0,21	0,35	0,32	0,63	0,28	0,44
15	0,45	0,22	0,20	0,35	0,46	0,67	0,29	0,46
60	0,41	0,22	0,20	0,32	0,38	0,67	0,30	0,47
360	0,54	0,23	0,41	0,33	0,49	0,65	0,49	0,48
1440	0,57	0,23	0,21	0,29	0,50	0,64	0,34	0,39
10080	0,59	0,22	0,37	0,29	0,48	0,67	0,41	0,38
43200	0,40	0,22	0,40	0,38	0,34	0,67	0,54	0,51

Vertinant pradinės deformacijos įtaką įtempto kompozito savybėms, pastebėta, kad kuo mažesnė yra pradinė deformacija, tuo mažesnės gaunamos grįžamosios deformacijos (4.9 ir 4.10 pav.). Tačiau būtina atkreipti dėmesį, kad taikant 9% deformaciją, dėl audiniams būdingo medžiagos sandaros ir savybių anizotropijos, kompozite vyksta siūlų tiesinimasis ir jėgų persiskirstymas tarp metmenų ir ataudų siūlų sistemų, todėl lokalių deformacijų netolygumas yra didelis (4.13 ir 4.14 lent.), o bandinys traukiantis ataudų kryptimi, metmenų kryptimi ilgėja. Šie rezultatai sutampa ir su kitų autorių darbais, tyrusiais audinių elgseną erdviųjų struktūrų formavimo metu, o taip pat jėgų persiskirstymą tarp metmenų ir ataudų siūlų tempimo metu [113-114, 117-120].

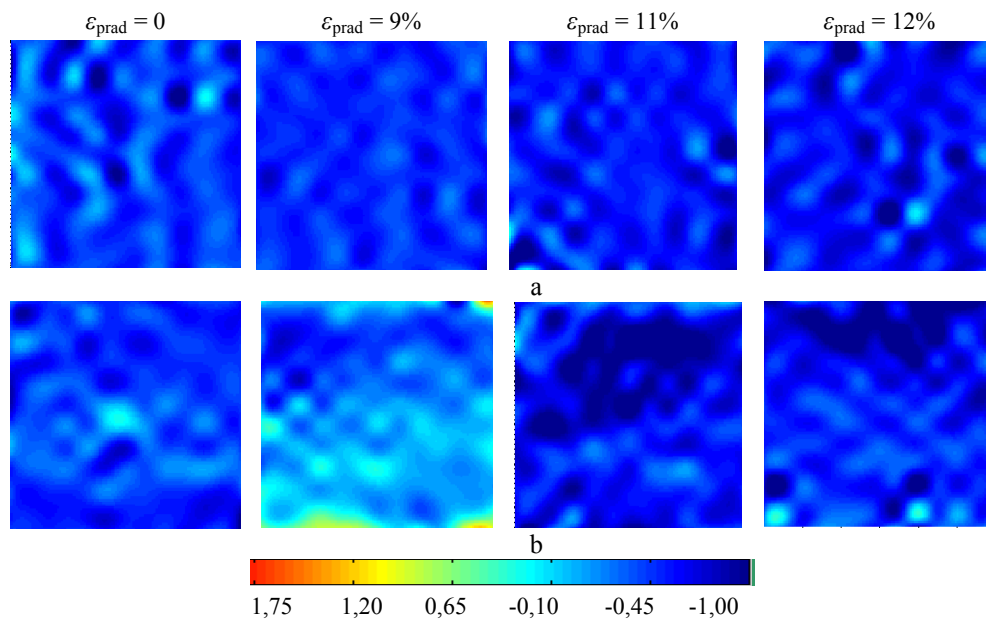


**4.9 pav.** Audiniu D1 armuoto kompozito relaksacinė elgsena: a – metmenų; b – ataudų kryptimis

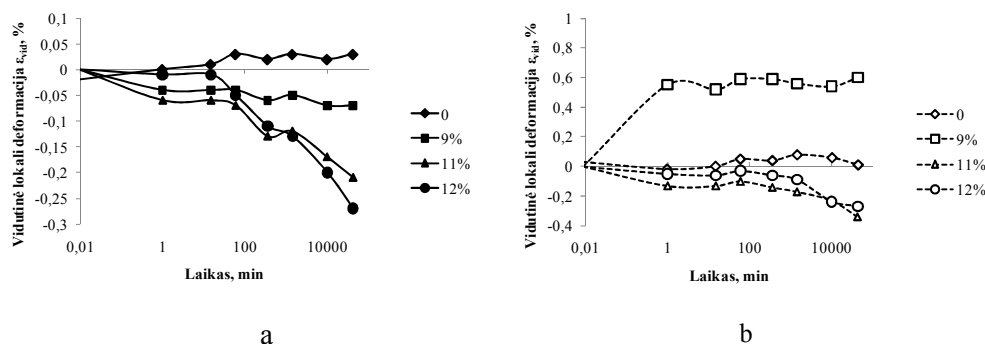




**4.10 pav.** Lokalių deformacijų pasiskirstymas audiniu D1 armuotame kompozite (a) metmenų ir (b) ataudų kryptimis relaksacinio proceso metu



**4.11 pav.** Lokalių deformacijų pasiskirstymas audiniu D2 armuotame kompozite (a) metmenų ir (b) ataudų kryptimis relaksacinio proceso metu



**4.12 pav.** Audiniu D2 armuoto kompozito relaksacinė elgsena (a) metmenų ir (b) ataudų kryptimis

Įtemptų bandinių vidutinės lokalių deformacijų vertės kito 0,67 – (-)0,29 % ribose, t.y. iki 10 % lyginant su vidutinėmis lokaliomis deformacijomis įtempiant. Todėl galima teigti, kad grįžtamosios deformacijos lyginant su pradinės deformacijos vertėmis yra mažos. Tačiau būtina atkreipti dėmesį, kad didžiausių deformacijų zonose gautos didesnės ir grįžtamosios deformacijos (4.12 pav.). Šiose zonose lokali deformacijos vertės sudarė iki 20% lokalių deformacijų įtempiant vertės. Pastebėta, kad esant mažoms pradinės deformacijos vertėms bandinyje dėl jėgų persiskirstymo ataudų kryptimi įgyjamos teigiamos vertės, o tuo tarpu metmenų kryptimi pasireiškia grįžtamosios deformacijos. Didinant pradinę deformaciją pasireiškia tampriosios jėgos, dėl to atsiranda grįžtamosios deformacijos, tačiau bandinys traukiasi abiem kryptimis. Matyti, kad audinio D2 vidutinės grįžtamosios deformacijos abiem kryptimis yra artimų verčių (4.32 ir 4.33 pav.), tuo tarpu audinys D1 ataudų kryptimi pasiekė didesnes grįžtamasias deformacijas nei metmenų. Taigi, įtemptų kompozitų atveju didesni įtempiai ir deformacijos gaunamos metmenų sistemos kryptimi, tačiau didesnės grįžtamosios deformacijos gaunamos ataudų kryptimi. Šie rezultatai gali būti siejami su didesne audinio grįžtamąja geba ataudų kryptimi. Iš gautų rezultatų galima daryti išvadą, kad sudaryta vaizdų analizės metodika gali būti panaudojama kompozitų deformacinės elgsenos analizavimui.

## IŠVADOS

1. Sudarytas bekontaktinis vaizdų analizės metodas leidžia realiu laiku nustatyti lokalias bandinio deformacijas ilgine ir skersine kryptimis  $\Delta b$  ir  $\Delta h$  rodikliais. Deformuojamame bandinyje išskiriamos apibrėžtos lokalių deformacijų zonos, kurių forma ir skaičius bandinio pailgėjimo metu kinta.
2. Nustatyta, kad didžiausios lokalių deformacijų vertės fiksuojamos tempiant austos struktūros įstrižus bandinius: maksimalios deformacijos pasireiškia centrinėje bandinio dalyje, kur tempimo kryptimi fiksuojamas 27,4 % pailgėjimas ir 42,8 % susiaurėjimas. Tempiamo bandinio centrinėje dalyje pasireiškia deformacijų netolygumas, kai išilginiai bandinio matmenys kinta lėčiau nei skersiniai, kas lemia klupimo raukšlės bandinio centrinėje dalyje susidarymą.
3. Gauti rezultatai patvirtino, kad sudaryta vaizdų sistema nustatytų pločio pokyčio  $\Delta b$  ir aukščio pokyčio  $\Delta h$  parametrų tikslumui įtakos turėjo fotografavimo atstumas bei bandinių apšvietimo kampas. Bandinio ženklavimo tinklas skaitmeniniuose vaizduose mažiausiai iškraipomas fotografuojant 25 cm atstumu ir taikant dviejų šaltinių šoninį apšvietimą, į bandinio plokštumą nukreiptą  $60^\circ$  kampą.
4. Matavimo proceso patikimumas įvertintas apskaičiuojant išplėstinę matavimo neapibrėžtį  $U(x)$ , kuri kinta intervale iki 4,5 %, kai pasiklivimo lygmuo lygus 95%.
5. Siūlomas metodas leido stebėti lokalias bandinio deformavimo zonas bei įstrižai tempiamoje austoje struktūroje nustatyti lokalių deformacijų pasiskirstymo netolygumą. Sudaryta vaizdų analizės metodika paaiškino laminuotų ir nelaminuotų austos struktūros sistemų elgsenos skirtumus ir atskleidė laminuotų sistemų formos pastovumo savybę. Laminuotų bandinių atveju pakito lokalių deformacijų zonos: jos tapo labiau išsklaidytos, tolygiau pasiskirstė per visą bandinio plotą. Laminavimas daugiau lėmė deformacijų skersine kryptimi kitimą: centrinėje dalyje bandiniams pasiekus didžiausią pailgėjimą jos sumažėjo 49 - 80 %, kai tuo pačiu laiko momentu tempimo kryptimi deformacijos didėjo 10 - 34 %.
6. Vaizdų analizės metodu austos struktūros medžiagų paviršiaus nusidėvėjimą galima įvertinti rodikliais  $R_{zi}$  - vidutinis mikronelygumų aukštis ir  $R_{max}$  - didžiausias mikronelygumų aukštis. Pastebėta, kad  $R_{zi}$  ir  $R_{max}$  verčių mažėjimas lyginant su nedildyto bandinio vertėmis, leidžia objektyviais rodikliais užfiksuoti neigiamą mažo grūdėtumo abrazyvų įtaką audinio paviršiaus kokybės savybėms.
7. Sudaryta vaizdų analizės metodika gali būti panaudojama kompozitų deformacinės elgsenos analizavimui. Įtemptų kompozitų atveju didesni įtempiai ir deformacijos gaunamos metmenų sistemos kryptimi, tačiau didesnės grįžtamosios deformacijos gaunamos ataudų kryptimi.
8. Nustatant lokalių deformacijų kitimą austoje struktūroje turi būti tiriamas visas deformacinis laukas, nes didžiausioji bandinio tempimo deformacija dažnai neatsipindi pokyčių tempiamoje austoje struktūroje, ko pasekoje sunku tirti formavimosi gebą. Siekiant tirti kritines deformavimo ribas ir nustatyti defektų susidarymo priežastis, tikslinga austų medžiagų elgseną vertinti aprašant lokalias bandinio deformacijas visame deformaciniame lauke.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. BURGER, W. and BURGE, M. J. *Digital image processing An Algorithmic Introduction Using Java*. Springer Science + Business Media, LLC, 2008.
2. BEHERA, B. K. Image – Processing in Textiles Textile. *Progress*. 2004, 35 (2/3/4).
3. MELNINKAITIS, A. *LTC Seminaras* [interaktyvus] [žiūrėta 2011-05-17]. Prieiga per internetą: <http://projektai.vu.lt>
4. IVANOV, D. et al. Strain mapping analysis of textile composites. *Optics and Lasers in Engineering*. 2009, 47, 360– 370. ISSN 0143-8166.
5. JEONG, S. H., KIM, S. H. and HONG, C. J. The Evaluation of Evenness of Nonwovens Using Image Analysis Method. *Fibers and Polymers*. 2001, 2, (3), 164-170. ISSN 1229-9197.
6. KANG, T. J. ET AL. Automatic Structure Analysis and Objective Evaluation of Woven Fabric Using Image Analysis. *Textile Research Journal*. 2001, 71(3), 261-270. ISSN 0040-5175.
7. ABDIN, Y. Description of draping behaviour of woven fabrics over single curvatures by image processing and simulation techniques. *Composites: Part B*. 2013, 45, 792–799. ISSN 1359-8368.
8. RAJA, D. et al. Comparison of different methods to measure the transverse wicking behaviour of fabrics. *Journal of industrial textiles*. 2014, 43(3), 366-382. ISSN 1528-0837.
9. XIN, B. and HU, J. An image based method for characterising the mechanical behaviours of fabrics. Part I: The measurement of in – plane tensile behaviour. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2008, 16(1), 72–75. ISSN 1230-3666.
10. LEGRAIN G. et al. An X-FEM and level set computational approach for image-based modelling: Application to homogenization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2011, 86, 915–934. ISSN 1097-0207.
11. FERRARI, S., PIURI, V. and SCOTTI, F. Image Processing for Granulometry Analysis via Neural Networks. *CIMSA 2008 - IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications, 14-16 July 2008, Instabul, Turkey*. 2008, pp. 28-32.
12. ISLAM, A., AKHTER, S. and MURSALIN, T. E. Automated Textile Defect Recognition System Using Computer Vision and Artificial Neural Networks. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2006, 13, 1307-6884. ISSN 1307-6884.
13. WATT, A., POLICARPO. F. *The Computer Image*. Addison-Wesley, Harlow, England 1998.
14. UMBAUGH, S. E. *Computer imaging: digital image analysis and processing*. Taylor & Francis, 2005.
15. LASAUSKAS, L. ir VYŠNIAUSKAS, V. Vaizdo kontūrų nustatymo būdų analizė. *Technologijos Mokslai/Technological Sciences*. 2008, 5(21), 21-25. ISSN 1648-8776.
16. PIERRON F. Application of full – field measurement techniques to composite materials and structures. *Composites: Part A*. 2008, 39(8), 1193. ISSN 1359-835X.
17. DOMSKIENĖ, J., STRAZDIENĖ, E. and DAPKUNIENĖ, K. The Evaluation of Technical Textiles Shape Stability by Image Analysis. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2002, 8(3), 304–311. ISSN 1392-1320.
18. ABRILL, H. C., MILLAN, M. S. and VALENCIA, E. Influence of the Wrinkle Perception with Distance in the Objective Evaluation of Fabric Smoothness. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2008, vol. 10, p. 1–10. ISSN 1464-4258.

19. ARAI, Y., SHIMAMURA, R., and YOKOZEKI, S. Dynamic out-of-plane deformation measurement using virtual speckle patterns. *Optics and Lasers in Engineering*. 2009, 47(5), 563–569. ISSN 0143-8166.
20. BARRIENTOS, B. et al. Measurement of Out-of-Plane Deformation by Combination of Speckle Photography and Speckle Shearing Interferometry. *International Journal for Light and Electron Optics*. 2004, 115(6), 248 – 252. ISSN 0030-4026.
21. LEE, J. R. et al. Y. Digital Phase-Shifting Grating Shearography for Experimental Analysis of Fabric Composites under Tension. *Composites: Part A*. 2004, 35, 849 – 859. ISSN 1359-835X.
22. HALE, R. D. An experimental investigation into strain distribution in 2D and 3D textile composites. *Composites Science and Technology*. 2003, 63(15), 2171–2185. ISSN 02663538.
23. FAN, J. *Clothing appearance and fit: science and technology*. Cambridge: Woodhead, 2004.
24. CHALAL, H. et al. Experimental Identification of A Nonlinear Model for Composites Using the Grid Techniques Coupled to the Virtual Fields Method. *Composites Part A*. 2006, 37, 315 – 325. ISSN 1359-835X.
25. LEE, W. et al. Bias – extension of woven composite Fabric. *International Journal of Material Forming*. 2008, 1(1), 895–898. ISSN 1960-6206.
26. SEMNANI, D., et al. Surface Roughness Measurement of Weft Knitted Fabrics Using Image Processing. *Fibers & textiles in Eastern Europe*. 2011, 19(3), 55-59. ISSN 1230-3666.
27. HADDADI, H. and BELHABIB, S. Use of Rigid-Body Motion for the Investigation and Estimation of the Measurement Errors Related to Digital Image Correlation Technique. *Optics and Lasers in Engineering*. 2008, 46, 185 – 196. ISSN 0143-8166.
28. CORR, D. et al. Digital Image Correlation Analysis of Interfacial Debonding Properties and Fracture Behaviour in Concrete. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007, 74, 109 – 121. ISSN 0013-7944.
29. KIRUGULIGE, M. S., TIPPUR, H. V. and DENNEY, T. S. Measurement of Transient Deformations Using Digital Image Correlation Method and High-Speed Photography Application to Dynamic Fracture. *Journal of the Optical Society of America*. 2007, 46(22), 5083–5096. ISSN 1084-7529.
30. PAN, B., QIAN, K. and XIE, H. Two-dimensional Digital Image Correlation for In-Plane Displacement and Strain Measurement: A Review. *Measurement Science and Technology*. 2009, 20, 1 – 17. ISSN: 0957-0233.
31. WILLEMS, A., et al. Drape – ability characterization of textile composite reinforcements using Digital image correlation. *Optics and Laser in Engineering*. 2008, 47(3–4), 343–351. ISSN 0143-8166.
32. MAK, K.L., PENG, P. and YIU, K.F.C. Fabric defect detection using morphological filters. *Image and Vision Computing*. 2009, 27, 1585–1592. ISSN: 0262-8856.
33. JING, J., LI, H. and LI, P. Combined fabric defects detection approach and quadtree decomposition. *Journal of Industrial Textiles*. 2012, 41(4), 331–344. ISSN 1528-0837.
34. JING, J. et al. Fabric defect detection using Gabor filters and defect classification based on LBP and Tamura method. *The Journal of the Textile Institute*. 2013, 104(1), 18–27. ISSN 0040-5000.
35. MAK, K. L. and PENG, P. An automated inspection system for textile fabrics based on Gabor filters. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2008, 24, 359–369.
36. ISLAM, A., AKHTER, S. and MURSALIN, T. E. Automated Textile Defect Recognition System Using Computer Vision and Artificial Neural Networks.

- Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2006, 13, 1307-6884. ISSN 2070-3740.
37. XIE, X. A Review of Recent Advances in Surface Defect Detection using Texture analysis Techniques. *Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis*. 2008, 7(3), 1-22. ISSN 1577-5097 E.
  38. KIM, S. and PARK, C. K. Evaluation of Fabric Pilling Using Hybrid Imaging Methods. *Fibers and Polymers*. 2006, 7(1), 57-61. ISSN 1229-9197.
  39. ZHANG, J., WANG, X., and PALMER S. The Robustness of Objective Fabric Pilling Evaluation Method. *Fibers and Polymers*. 2009, 10(1), 108-115. ISSN 1229-9197.
  40. WAN, A. and YU, W. The effects of wool surface characteristic on fuzzing and pilling of knitted fabrics. *Fibers and Polymers*. 2011, 12(4), 528-533. ISSN 1229-9197.
  41. JASIŃSKA, I. Assessment of a Fabric Surface after the Pilling Process Based on Image Analysis. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2009, 17(2), 55-58. ISSN 1230-3666.
  42. KIM, S. C. and KANG T. J. Image Analysis of Standard Pilling Photographs Using Wavelet Reconstruction. *Textile Research Journal*. 2005, 75(12), 801–811. ISSN 0040-5175.
  43. SEMNANI, D. and GHAYOOR, H. Detecting and Measuring Fabric Pills Using Digital Image Analysis. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009, 49, 953-956. ISSN 20103778.
  44. BLANES J. S. ET AL. Garment smoothness appearance evaluation through computer vision. *Textile Research Journal*. 2012, 82(3), 299-309. ISSN 0040-5175.
  45. MEMARIAN, F., AMANI-TEHRAN, M. and LATIFI, M. Rank Ordering and Image Processing Methods Aided Fabric Wrinkle Evaluation, *Fibers and Polymers*. 2011, 12(6), 830-835. ISSN 1229-9197.
  46. YANG, A. et al. Digital Description of the ISO Wrinkle Replicas using 3D Image Analysis. *Fibers and Polymers*. 2009, 10, (4), 539-545. ISSN 1229-9197.
  47. ROSLI, A. D. et al. Index on Fabric Wrinkle Using Image Processing Technique. 2012 *IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC 2012)*, 16 Jul - 17 Jul 2012, Universiti Teknologi MARA (UiTM) Shah Alam, Selangor, Malaysia, 2012, pp. 186-190.
  48. BUGAO, X., SIHONG, W. and JIE, S. Fiber Image Analysis Part III: Autonomous Separation of Fiber Cross Sections. *The Journal of Textile Institute*. 1999, 90, 288-297. ISSN 0040-5000.
  49. SIAVASH, A., AKBAR, M. A. and ASGHARIAN J. A. A. Geometrical parameters of yarn cross-section in plain woven fabric. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*. 2013, 38, 126–131. ISSN 0971-0426.
  50. JIN, Y. and JANG, J. J. Applying Image Analysis to Automatic Inspection of Fabric Density for Woven Fabrics. *Fibers and Polymers*. 2005, 6(2), 156-161. ISSN 1229-9197.
  51. MAK, K.L., PENG, P. and YIU, K.F.C. Fabric defect detection using morphological filters. *Image and Vision Computing*. 2009, 27, 1585–1592. ISSN 0262-8856.
  52. LARBERG, Y. and ÅKERMO, M. In-plane deformation of multi-layered unidirectional thermoset prepreg – Modelling and experimental verification. *Composites: Part A*. 2014, 56, 203–212. ISSN 1359-835X.
  53. PENG, X.Q. and CAO, J. A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics. *Composites: Part A*. 2005, 36, 859–874. ISSN 1359-835X.

54. KENKARE, N. and PLUMLEE, T. M. Fabric drape measurement: a modified method using digital image processing. *Journal of Textile and Apparel*. 2005, 4(3), 1 – 8. ISSN 15330915.
55. Kenkare, N. and Plumlee, T. M. Evaluation of drape characteristics in fabrics. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2005, 17(2), 109-123. ISSN 0955-6222.
56. JEONG, Y. J. and JANG, J. Objective Measurement of Water Repellency of Fabric Using Image Analysis (I)–Methodology of Image Processing. *Fibers and Polymers*. 2005, 6(2), 162-168. ISSN 1229-9197.
57. RAJA, D. et al. Comparison of different methods to measure the transverse wicking behaviour of fabrics. *Journal of industrial textile*. 2014, 43(3), 366-382. ISSN 1528-0837.
58. WILLEMS, A., et al. Deformability characterization of fabrics using large and small scale full field optical strain measurements. *Department of Mechanical Engineering, 29 August – 1 September, 2006, Leuven, Belgium, 2006*, pp. 1–8.
59. LOMOV, S. V., ET AL. Picture frame test of woven composite reinforcements with a full-field strain registration. *Textile Research Journal*. 2006, 76(3), 243–252. ISSN 0040-5175.
60. SUTTON, M. A., ORTEU, J. J. and SCHREIER, H. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*. Springer Science & Business Media, 2009.
61. Cintron, R. and Saouma, V. Strain measurements with the Digital image correlation system Vic – 2D. *Department of Civil Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado Boulder*. 2008, p. 1 – 23.
62. *Fotografijos kompozicija*. Priega per internetą [žiūrėta: 2013 m. gruodžio 15 d.] :[http://markasm.weebly.com/uploads/1/5/8/8/1588828/fotografijos\\_kompozicija.pdf](http://markasm.weebly.com/uploads/1/5/8/8/1588828/fotografijos_kompozicija.pdf)
63. JIN, L. et al. Three-dimensional deformation measuring system based on vision method. *Mechanical and Electrical Technology: 2th International Conference, September 10-12, 2010, Singapore, Singapore. School of Computer Science: Guizhou University, 2010*, pp. 748-753.
64. KARAZIJA, G. ir VASILIAUSKAS, V. Automatizuotas verpalų dengiamosios gebos įvertinimas. *Vartojimo reikmenų technologijos ir dizainas : konferencijos pranešimų medžiaga*, 1998, 281-289. ISBN 9955090510.
65. MITSUO, M., HAN, J. and YANG, M. Objective Evaluation Method for Appearance of Fabric Wrinkling Replica by Image Processing System. *Journal of Textile Engineering*. 2002, 48(1), 11-16. ISSN 1346-8235.
66. BEEB, L.A.A., VERBERNE, C.W. and PEERLINGS, R.H.J. Experimental identification of a lattice model for woven fabrics: Application to electronic textile. *Composites: Part A*. 2013, 48, 82–92. ISSN 1359-835X.
67. HAO, H. et al. Three-Dimensional Deformation Measuring System Based on Vision Method. *International Conference on Mechanical and Electrical Technology, September 10-12, 2010, Singapore, Singapore. School of Computer Science: Guizhou University, 2010*, pp. 748 – 753.
68. FILHO, R. A. C. and MARCONDES, P. V. P. True Strain Distribution Profile on Sheet Metal Using Different Punch Geometries, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2008, 30(1), 1-6. ISSN 1678-5878.
69. AHMET, H., AYDILEK, G. M. and TUNCER, B. E. Use of Image Analysis in Determination of Strain Distribution During Geosynthetic Tensile Testing. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2004, p. 65 – 74. ISSN 0887-3801.

70. KONG, H., MOURITZ, A.P. and PATON, R. Tensile extension properties and deformation mechanisms of multi-axial non-crimp fabrics. *Composite Structures*. 2004, 66, 249–259. ISSN 0263-8223.
71. SHARMA, S.B. Sutcliffe a simplified finite element model for draping of woven material. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2004, 35(6), 637–643. ISSN 1359-835X.
72. SACEVIČIENĖ, V. et al. Influence of the Elastane Fibre on the Woven Fabric Structural Mobility. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2011, 17(4), 413-416. ISSN 1392-1320.
73. VANCLOOSTER, K., LOMOV, S.V. and VERPOEST, I. On the formability of multi-layered fabric composites. *ICCM—17th International Conference on Composite Materials, July 27-31, 2009, Edinburgh, UK. IOM Communications Ltd on behalf of The British Composites Society, a division of The Institute of Materials, Minerals and Mining*, 2009, pp. 1–10.
74. SASSO, M. and AMODIO, D. Development of a biaxial stretching machine for rubbers by optical methods. *Conference: 2006 SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics. Dip. Meccanica, Università Politecnica delle Marche via Brecce Bianche*. 2006, pp. 1-11.
75. ASAME Technology Offers Online Demos for Strain and Geometry Measurements Made with Digital Camera-Based Systems. Priega per internetą [žiūrėta: 2010 m. lapkričio 11 d.]: <http://www.send2press.com/newswire/2009-09-0928-002.shtml>
76. XUE, P., YU, T.X. and TAO, X.M. Effect of cell geometry on the energy-absorbing capacity of grid-domed textile composites. *Composites: Part A*. 2000, 31, 861–868. ISSN 1359-835X.
77. SKORDOS, A.A. and MONROY ACEVES, C. and SUTCLIFFE, M.P.F. A Simplified Rate Dependent Model of Forming and Wrinkling of Pre-Impregnated Woven Composites. *Composites: Part A*. 2007, 38(5), 1318–1330. ISSN 1359-835X.
78. HIVET, G. et al. Analysis of Woven Reinforcement Performing using an Experimental Approach. *10th international conference on textile Composite (Texcomp), LILLE*, October 26-28, 2010, France, 2007, pp. 1-7
79. JAUFFRÈS, D. et al. Simulation of the thermo stamping of woven composites: determination of the tensile and in-plane shearing behaviors. *International Journal of Material Forming*. 2009, 2(1), 161 – 164. ISSN 1960-6206.
80. WANG, C., DU, X. and WAN, Z. Experimental study on wrinkling behaviors and characteristics of space structures. *Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures: 13 th International Conference on Experimental Mechanics*, July 1-6, 2007, Alexandroupolis, Harbin Institute of Technology, 2007, pp. 431-432.
81. PARSONS, E. M. and SOCRATE, S. Impact of multi-layer woven Fabric: experiments and continuum-level simulations. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2010, 58, 1995 – 2021. ISSN 0022-5096.
82. STOILOV, G., KAVARDZHNIKOV, V. and PASHKOULEVA D. A. Comparative Study of Random Patterns for Digital Image Correlation. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2012, 42(2), 55–66. ISSN 0861-6663.
83. RUZGIENĖ, B. Skaitmeninio reljefo modelio kūrimo metodai ir tikslumo tyrimas, taikant skaitmeninės fotogrametrijos technologiją. *Geodezija Ir Kartografija / Geodesy and Cartography*. 2010, 36(2), 57–62. ISSN 1392–1541.
84. GAO, Z. and DESAI, J. P. Estimating zero-strain states of very soft tissue under gravity loading using digital image correlation. *Medical Image Analysis*. 2010, 14, 126–137. ISSN 13618415.



85. SZTEFEK, P. et al. Using digital image correlation to determine bone surface strains during loading and after adaptation of the mouse tibia. *Journal of Biomechanics*. 2010, 43, 599–605. ISSN 0021-9290.
86. ROSSI, M., BROGGIATO, B.G. and PAPALINI, S. Identification of Ductile Damage Parameters Using Digital Image Processing. *Conference: 2006 2006 SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics*. 2006, pp. 1-8
87. GIANCANE, S. et al. Fatigue damage evolution of fiber in forced composites with digital image correlation analysis. *Procedia Engineering*. 2010, 2, 1307–1315. ISSN: 0733-9372.
88. TOUCHAL, S., MORESTIN, F. and BRUNET, M. Various experimental applications of digital image correlation method. In: *Proceedings of CMEM 97 (computational methods and experimental measurements VIII), Rhodes*. 1997, pp. 45–58.
89. TUNG, S.H., SHIH M. H. and SUNG, W. P. Development of digital image correlation method to analyse crack variations of masonry wall. *Sadhana*. 2008, 33(6), 767–779. ISSN 1619-7070.
90. LECOMPTE, D. et al. Quality assessment of speckle patterns for Digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*. 2006, 44, 1132–1145. ISSN 0143-8166.
91. CARVELLI, V. et al. Deformability of a non-crimp 3D orthogonal weave E-glass composite reinforcement. *Composites Science and Technology*. 2012, 73, 9–18. ISSN 02663538.
92. KUO, J., SHIH, C. H. Y. and LEE, J.Y. Repeat pattern segmentation of printed fabrics by hough transform method. *Textile Research Journal*. 2005, 75(11), 779-783. ISSN 0040-5175.
93. SILBERSTEINA, M. N. et al. Elastic–plastic behavior of non-woven fibrous mats. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2012, 60, 295–318. ISSN 0022-5096.
94. MASKELIŪNAS, R. et al. *Poligrafija: vadovėlis*. Vilnius: Technika, 2001.
95. RUGGLES, P. K. *Printing estimating: costing methods for digital and traditional graphic imaging*. 4th ed. Albany, Delmar, 1996.
96. BUIKA, G. *Spaudos dažai*. Kaunas: Technologija, 2009.
97. *Dantec Dynamics - laser optical measurement systems* [interaktyvus] [žiūrėta 2014-07-21]. Prieiga per internetą: <http://www.dantecdynamics.com>.
98. JUCIENĖ, M. ET AL. The effect of laser technological parameters on the color and structure of denim fabric. *Textile Research Journal*. 2014, 84, (6), 662-670. ISSN 0040-5175.
99. JING, J. ET AL. Objective evaluation of fabric pilling based on wavelet transform and the local binary pattern. *Textile Research Journal*. 2012, 82(18) 1880-1887. ISSN 0040-5175.
100. KIMAND, S. and KYU-PARK, C. Evaluation of Fabric Pilling Using Hybrid Imaging Methods. *Fibers and Polymers*. 2006, 7(1), 57-61. ISSN 1229-9197.
101. DROBINA, R. and MACHNIO M. S. Application of the Image Analysis Technique for Textile Identification. *AUTEX Research Journal*. 2006, 6(1) 40-48. ISSN 1470-9589.
102. LIŽAUSKIENĖ, R. ir STRAZDIENĖ, E. Trikotažo struktūros tyrimai vaizdų analizės metodu. *Vartojimo reikmenų technologijos ir dizainas 2001: konferencijos pranešimų medžiaga*. 2001. 179–182. ISBN: 9955090510.
103. PAN, R. et al. Automatic Inspection of Double-system-mélange Yarn-dyed Fabric Density with Color-gradient Image. *Fibers and Polymers*. 2011, 12(1), 127-131. ISSN 1229-9197.

104. ÇAY A. et al. On the use of image processing techniques for the estimation of the porosity of textile fabrics. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2005, 2, 76-79. ISSN 20103778.
105. CARVALHO, L., et al. Objective Evaluation of Clothing Pilling Formation by Optical Profile Analysis. *International Textile, Clothing and Design Conference – Magic World of Textiles, October 3-6, 2010, Zagreb, Croatia: University of Zagreb*, 2010, pp. 560 – 565.
106. KUO, J. et al. Color and Pattern Analysis of Printed Fabric by an Unsupervised Clustering Method. *Textile Research Journal*. 2005, 75(1), 9 – 12. ISSN 0040-5175.
107. KAVALLIAUSKAITĖ, L. and STRAZDIENĖ, E. Lininių audinių traukumo ir glamžumo tyrimas. *Gaminių technologijos ir dizainas 2004 : konferencijos pranešimų medžiaga*. 2004, 129-133. ISSN 1822-492X.
108. NA, Y. and POURDEYHIMI, B. Assessing wrinkling using image analysis and replicate standards. *Textile Research Journal*. 2007, 29, 301-319. ISSN 0040-5175.
109. ROSLI, A.D. et al. Index on fabric wrinkle using image processing technique Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), *2012 IEEE, 16-17 July 2012, Shah Alam, Selangor*. 2012, pp. 186–190.
110. HIROAKI, I. et al. Measurement of surface properties of woven fabrics using optical fiber bundle. *Journal of Textile Engineering*. 2002, 48, 5 – 9. ISSN 1346-8235.
111. GLIESCHE, K., HUBNER, T. and ORAWETZ H. Investigations of In – Plane Shear Properties of  $\pm 45^\circ$  - Carbon/ Epoxy Composites using Tensile Testing and Optical Deformation Analysis. *Composites Sciences and Technology*. 2005, 65, 163-197. ISSN 02663538.
112. GRÉDIAC, M. The use of full-field measurement methods in composite material characterization: interest and limitations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2004, 35(7–8), 751–761. ISSN 1359-835X.
113. WILLEMS, A. et al. Optical strain fields in shear and tensile testing of textile reinforcements. *Composites Science and Technology*. 2008, 68, 807–819. ISSN 02663538.
114. CAVALLARO, P.V., SADEGH, A.M. and QUIGLEY, C.J. Decrimping Behavior of Uncoated Plain-woven Fabrics Subjected to Combined Biaxial Tension and Shear Stresses. *Textile Research Journal*. 2007, 77, 403-416. ISSN 0040-5175.
115. PENA, D.M., LORENS, I. and SASTRE, R. Application of the Tensegrity Principles on Tensile Textile Constructions. *International Journal of Space Structures*. 2010, 25(1), 57-67. ISSN 0266-3511.
116. BEKAMPIENĖ, P., DOMSKIENĖ, J. and ŠIRVAITIENĖ, A. The Effect of Pre-Tension on Deformation Behaviour of Natural Fabric Reinforced Composite. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2011, 17(1) 56–61. ISSN 1392-1320.
117. CHEN, F. et al. Mechanical properties of a woven ramie fabric under multidimensional loadings. *Textile Research Journal*, 2011, 81(12), 1226-1233. ISSN 0040-5175.
118. WANG, G. et al. Interactive effect between warp and weft of a woven ramie fabric under biaxial loadings. *The Journal of The Textile Institute*. 2012, 103(3), 283-291. ISSN 0040-5000.
119. OUAGNE, P. D. et al. Complex shape forming of flax based woven fabrics. Analysis of the yarn tensile strain during the process. *Key Engineering Materials*. 2012, 504-506. ISSN 1662-9795.
120. POTLURI, P. et al. Shyng Meso-scale Strain Mapping in UD woven Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2009, 40(12) 1838–1845. ISSN 1359-835X.

121. OUAGNE, D. et al. Analysis of defects during the performing of a woven flax reinforcement. *Advanced Composites Letters*. 2011, 105-108. ISSN 0963-6935.
122. SCHLICHTING, LH. et al. Composite resin reinforced with pre-tensioned glass fibers. Influence of prestressing on flexural properties. *Dent Mater*. 2010, 26(2), 118-125.
123. ZHANG, Y., XIA, Z. and ELLYIN, F. Evolution and influence of residual stresses/strains of fiber reinforced laminates. *Composites Science and Technology*. 2004, 64, 1613-1621. ISSN 02663538.
124. PARLEVLIET, P.P., BERSEE, H. E.N. and BEUKERS, A. Residual stresses in thermoplastic composites – A study of the literature – Part I: Formation of residual stresses. *Composites: Part A*. 2006, 37, 1847-1847. ISSN 1359-835X.
125. DVIKOVA, J., et al. Audinių charakteristikų nustatymas įstrižo tempimo metu. *Gaminių technologijos ir dizainas 2007: konferencijos pranešimų medžiaga*. 2007, 73 – 77. ISSN 1822-492X.
126. KRIVOJYTĖ, R. ir DOMSKIENĖ, J. Įstrižo bandinio klūpdyimo pradinių sąlygų nustatymas vienašio tempimo metu. *Gaminių technologijos ir dizainas 2003: konferencijos pranešimų medžiaga*. 2003, 119–124. ISSN 1822-492X.
127. DAUSYNAITĖ, A., et al. Formavimosi savybių priklausomybė nuo audinių sandaros. *Gaminių technologijos ir dizainas 2007: konferencijos pranešimų medžiaga*. 2007, 119-123. ISSN 1822-492X.
128. DOMSKIENĖ, J. and STRAZDIENĖ, E. Investigation of Fabric Shear Behaviour. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2005, 13(2), 26-30. ISSN 1230-3666.
129. DOLATABADI, M. K., KOVAŘ, R. and LINKA, A. Geometry of plain weave fabric under shear deformation. Part I: measurement of exterior positions of yarns. *The Journal of the Textile Institute*. 2009, 100(4), 368–380. ISSN 0040-5000.
130. AL-GAADI, B. and HALÁS, Z. M. Deformation Analysis of Composite Reinforcing Fabrics through Yarn Pull-out, Drape and Shear Tests. *Fibers and Polymers*. 2013, 14(5), 804-814. ISSN: 1229-9197.
131. Domskienė, J., Strazdienė, E., Bekampienė, P. Development and optimisation of image analysis technique for fabric buckling evaluation. *International Journal of Clothing Science Technology*. 2011, 23, p. 329-340.
132. CAO, J. et al. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2008, 39(6), 1037–1053. ISSN 1359-835X.
133. THIJE, R.H.W. and AKKERMAN, R. Solutions to intra-ply shear locking in finite element analyses of fibre reinforced materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2008, 39(7) 1167–1176. ISSN 1359-835X.
134. JCGM 100:2008. *Evaluation of measurement data guide to the expression of uncertainty in measurement*. 2008
135. TAHA, I., ABDIN, Y., and EBEID, S. Comparison of Picture Frame and Bias-extension Tests for the Characterization of Shear Behaviour in Natural Fibre Woven Fabrics. *Fibers and Polymers*. 2013, 14, 338-344. ISSN 1229-9197.
136. HARRISON, P. et al. Characterising the shear–tension coupling and wrinkling behaviour of woven engineering fabrics. *Composites: Part A*. 2012, 43, 903–914. ISSN 1359-835X.
137. KING, MJ, JEARANAISILAWONG, P. and SOCRATE, S. A continuum constitutive model for the mechanical behavior of woven fabrics. *International Journal of Solids and Structures*. 2005, 42, 3867–3896. ISSN 0020-7683.

138. HAO, H. et al. Three-dimensional deformation measuring system based on vision method. *In: Mechanical and Electrical Technology (ICMET), 2010 2nd International Conference, Singapore, 10-12 Sept. 2010*, p. 748-753.
139. ČITAVIČIUS et al. Dygsnio ilgio siūlėje matavimo metodo paklaidų analizė. *Vartojimo reikmenų technologijos ir dizainas : konferencijos pranešimų medžiaga*. 1998, 98-103. ISBN 9955090510.
140. Lietuvos standartas. LST EN 12127:1999. Tekstilė. Tekstilės medžiagos. Paviršinio tankio nustatymas naudojant mažus bandinius.
141. Lietuvos standartas. LST EN ISO 5084:2000. Tekstilė. Tekstilės medžiagų ir gaminių storio nustatymas (ISO 5084:1996).
142. PEIRCE, F.T. The „Handle“ of Cloth as a Measurable Quantity. *Journal of the Textile Institute*. 1930, 21(11), T377-T416. ISSN 0040-5000.
143. DVIKOVA, J., et al. Audinių charakteristikų nustatymas įstrižo tempimo metu. *Gaminių technologijos ir dizainas 2007: konferencijos pranešimų medžiaga*. 2007, 73-77. ISSN 1822-492X.
144. HAMILA, N. AND BOISSE, P. Locking in simulation of composite reinforcement deformations. Analysis and treatment. *Composites: Part A*. 2013, 53, 109–117. ISSN 1359-835X.
145. DAGHBOUDJ, S. and SATHA, H. Determination of the in-plane shear rigidity modulus of a carbon non-crimp fabric from bias-extension data test. *Journal of Composite Materials*. 2013, 48(22), 2729-2736. ISSN 1530-793X.
146. ZHU, B., YU, T.X, and TAO, X.M. Large deformation and slippage mechanism of plain woven composite in bias extension. *Composites: Part A*. 2007, 38, 1821–1828. ISSN 1359-835X.
147. Lietuvos standartas. Tekstilė. Tempiamosios medžiagų savybės. 1 dalis. Didžiausios jėgos ir pailgėjimo esant šiai jėgai nustatymas juostelės metodu (ISO 13934-1:2013).
148. Haile, M. A., Yin, W., Ifju, P.G. MATLAB based image pre-processing and digital image correlation of objects in liquid. *Proceedings of the SEM Annual Conference, June 1th to June 4th, 2009, Albuquerque New Mexico USA, 2009*. p. 1 – 11.
149. Lietuvos standartas. Tekstilės medžiagos. Audiniai. Sandara. Bandymo būdas. 2 dalis. Siūlų skaičiaus vienetiniame ilgyje nustatymas (modifikuotas ISO 7211-2:1984)
150. ISO 139:2005 Textiles – Standard atmospheres for conditioning and testing.
151. DARGIENĖ, J. ŠIRVAITIENĖ, A. et al. Relaxation analysis of pre-tensioned natural fabric reinforced composite // *Konferencijos pranešimų medžiaga: Mechanika 2013: proceedings of the 18th international conference*. 2013, 62-65. ISSN 1822-2951.
152. GOUTIANOS, S. et al. Development of Flax Fibre Based Textile Reinforcements for Composite Applications. *Applied Composite Materials*. 2006, 13, 199 – 215. ISSN 0929-189X.
153. UMBAUGH, S., E. *Computer imaging: digital image analysis and processing*. Taylor & Francis, 2005.
154. KONG, H., MOURITZ, A. and PATON, P. R. Tensile extension properties and deformation mechanisms of multiaxial non-crimp fabrics. *Composite Structures*. 2004, 66(1-4), 249–259. ISSN 0263-8223.
155. SUTCLIFFE, M.P.F. A simplified finite element model for draping of woven material. *Composites: Part A*. 2004, 35, 637–643. ISSN 1359-835X
156. TARIGOPULA, V. et al. Study of Localisation in Dual-Phase High-Strength Steles under Dynamic Loading using Digital Image Correlation and FE Analysis. *International Journal of Solids and Structures*. 2008, 45, 601-619. ISSN 0020-7683.
157. GONZALES R. C., WOODS R. E. *Digital Image Processing*. Prentice Hall. P. 2007.

158. Žilinskas, R. P. *Matavimų rezultatų neapibrėžties įvertinimas*. [interaktyvus] [žiūrėta 2014-04-11]. Prieiga per internetą: <http://www.mi.ktu.lt>
159. JCGM 100:2008. *Evaluation of measurement data guide to the expression of uncertainty in measurement*.
160. MEŠKUOTIENĖ, A. Galinių ilgio matų susietumo sistemologinis tyrimas. *Matavimai*. 1999, 1(10), 14-19. ISSN 1392-1223.
161. BEKAMPIENĖ, P. and DOMSKIENĖ, J. Influence of Stitching Pattern on Deformation Behaviour of Woven Fabric during Forming. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2010, 16(3), 226-230. ISSN 1392-1320.
162. BEKAMPIENĖ, P. and DOMSKIENĖ, J. Analysis of Fabric Specimen Aspect Ratio and Deformation Mechanism during Bias Tension. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2009, 15(2), 167-172. ISSN 1392-1320.
163. ЗЫБИН, А. Ю. Двухосное растяжение материалов для верха обуви. Москва, Легкая промышленность, 1974.
164. MASTEIKAITĖ, V. AND SACEVIČIENĖ, V. A method for mobility estimation of textile-polymeric systems. *Fibers and Polymers*. 2010, 11(6), 869-876. ISSN 1229-9197.
165. ФИЛАТОВ В.Н. *Упругие текстильные оболочки: Моногр.* Москва: Легпромбытиздат, 1987.
166. GAIER, J. R. et al. Abrasion of Candidate Spacesuit Fabrics by Simulated Lunar Dust. *39th International Conference on Environmental Systems (ICES) sponsored by the Society of Automotive Engineers International Savannah, July 12-16, Georgia, 2009*. pp. 1-20.
167. BRZEZINSKI, S. et al. Structure and Properties of Micro porous Polyurethane Membranes Designed for Textile – Polymeric Composite Systems. *Fiber and Textiles in Eastern Europe*. 2005, 13(6), 53-58. ISSN 1230-3666.
168. PAN N., HE J. and YU J. Fibrous materials as Soft Matter. *Textile Research Journal*, 2007, 77(4), 205 – 213. ISSN 0040-5175.
169. DAUKANTIENĖ V. and GUTAUSKAS M. The Structural Changes of Polyethylene Film during Punch Deformation. *Material Science (Medžiagotyra)*, 2007, 9(2), 191-194. ISSN 1392-1320.

## MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

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

1. Dargienė, Jovita; Lukšaitė, Dalia; Domskienė, Jurgita. Image based method for the investigations of low flexure rigidity materials // Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. ISSN 1736-7530 (electronic). ISSN 1736-6046 (print). 2012, vol. 61, no. 3. p. 185-192. [ISI Web of Science].
2. Dargienė, Jovita; Domskienė, Jurgita; Gulbinienė, Ada. Peculiarities of specimen preparing for the image analysis investigation of woven structure deformations // Material Science (Medžiagotyra). ISSN 1392 –1320, 2013, vol. 19, no. 1. p. 73-77. [ISI Web of Science; INSPEC].
3. Dargienė, Jovita; Domskienė, Jurgita. Errors of image analysis technique for the textile deformations behaviour investigation // Fibers and Polymers. ISSN 1875-0052 (electronic version), ISSN: 1229-9197 (print version). 2013, vol.14, no.9. 1574-1580. [ISI Web of Science].
4. Meškuotienė, Asta; Dargienė Jovita; Domskienė, Jurgita. Metrological performance of digital image analysis method applied for the investigation of textile deformation; Textile Research Journal. ISSN: 1746-7748 (electronic version), ISSN: 0040-5175 (print version). 2015, vol. 85, no. 1 71-79. [ISI Web of Science].

Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, neturinčiuose citavimo indekso

1. Dargienė, Jovita; Širvaitienė, Anne; Bekampienė, Paulė; Domskienė, Jurgita; Jankauskaitė Virginija. Relaxation analysis of pre-tensioned natural fabric reinforced composite // Konferencijos pranešimų medžiaga: Mechanika 2013: proceedings of the 18th international conference. ISSN 1822-2951, p. 62-65. [ISI Proceedings].

Kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose paskelbti straipsniai. Konferencijų pranešimų medžiagoje paskelbti straipsniai

1. Lukšaitė, Dalia; Dargienė, Jovita; Domskienė Jurgita. Vaizdų analizės metodo pritaikymas audinio lokalioms deformacijoms tirti // Gaminių technologijos ir dizainas‘2011: konferencijos pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas. Kaunas: Technologija, ISSN 1822-492X. 2011, p. 55-59.
2. Lukšaitė, Dalia; Dargienė, Jovita; Domskienė Jurgita. Medžiagos savybių įtaka vietinėms deformacijoms tempiant įstrižai // Gaminių technologijos ir dizainas‘2012: konferencijos pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas. Kaunas: Technologija, ISSN 1822-492X. 2012, p. 127-131.
3. Dargienė, Jovita; Stauskaitė, Justina; Domskienė, Jurgita; Milašienė, Daiva. The Influence of exploitation conditions on protective textiles behaviour // AUTEX 2013 [elektroninis išteklius]: proceedings of the 13th AUTEX World Textile Conference, 22-24 May, 2013, Dresden, Germany / Institute of Textile Machinery and high performance material technology, Technische Universität Dresden. Dresden : ITM, 2013. ISBN 9783867803434. p. [1-4].

## PRIEDAI

*KTU\_Image JD* programos kūrėjai Jovita Dargienė ir Marijonas Petraukas (Edenburgo universiteto IV-kurso studentas). Dėkoju Marijonui už pagalbą kuriant šią programą.

*KTU\_Image JD* programos kodas:

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Diagnostics;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.IO;
using System.Windows.Forms;
using System.Globalization;

namespace KTU_Image_JD
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        private ResultsFile currentView;
        private List<ResultsFile> resultsList;
        CultureInfo ci;
        private bool showingDeltas = false;

        public Form1()
        {
            ci = (CultureInfo)CultureInfo.CurrentCulture.Clone();
            ci.NumberFormat.NumberDecimalSeparator = ".";
            InitializeComponent();
            resultsList = newList<ResultsFile>();
        }

        private void pictureBox1_Paint(object sender, PaintEventArgs e)
        {
            e.Graphics.Clear(Color.White);
            if (currentView == null)
                return;
            ResultsFile rf = currentView;
            e.Graphics.SmoothingMode = System.Drawing.Drawing2D.SmoothingMode.HighQuality;
            Size area = pictureBox1.ClientSize;
            float pxmm = Math.Min(area.Width / rf.plotWidth,
                area.Height / rf.plotHeight);
            Point offset = new Point((int)(area.Width - rf.plotWidth * pxmm) / 2, (int)(area.Height -
                rf.plotHeight * pxmm) / 2);
            Size prarea = new Size((int)(rf.plotWidth * pxmm), (int)(rf.plotHeight * pxmm));
            e.Graphics.DrawRectangle(Pens.Gray, new Rectangle(offset, prarea));
            foreach (Circle c in rf.circles)
            {
                Rectangle cr;
                if (!checkBox2.Checked)
                    cr = new Rectangle((int)(offset.X + pxmm * (c.CX - c.W / 2)),
                        (int)(offset.Y + pxmm * (c.CY - c.H / 2)),
                        (int)(pxmm * c.W), (int)(pxmm * c.H));
                else
                    cr = new Rectangle((int)(offset.X + pxmm * c.CX - 4), (int)(offset.Y +
                        pxmm * c.CY - 4), 8, 8);
                Brush brush = rf.useColors ? new SolidBrush(c.Color) : Brushes.DarkGray;
                e.Graphics.FillEllipse(brush, cr);
            }
        }
    }
}
```

```

if (checkBox1.Checked)
    {
    string label = c.Index + "";
    SizeF ss = e.Graphics.MeasureString(label, SystemFonts.DefaultFont);
        ss.Width /= 2; ss.Height /= 2;
        e.Graphics.DrawString(label, SystemFonts.DefaultFont,
Brushes.Black, newPointF(offset.X + pxmm * c.CX, offset.Y + pxmm * c.CY) - ss,
StringFormat.GenericDefault);
    }
}

private void loadResultsFile(string filename)
{
    TextReader tr;
    try
        {
        tr = new StreamReader(filename);
        }
    catch (ArgumentException)
        {
        MessageBox.Show("Failas neegzistuoja");
        return;
        }
    ResultsFile rf = new ResultsFile();
        rf.circles = newList<Circle>();
    string[] header = tr.ReadLine().Split('\t');
    int areaField = Array.IndexOf(header, "Area");
    int cxField = Array.IndexOf(header, "X");
    int cyField = Array.IndexOf(header, "Y");
    int perimField = Array.IndexOf(header, "Perim.");
    int wField = Array.IndexOf(header, "Width");
    int hField = Array.IndexOf(header, "Height");
    if (areaField == -1 || cxField == -1 || cyField == -1 || perimField == -1 ||
        wField == -1 || hField == -1)
        {
        MessageBox.Show("Faile trūksta stulpelių");
        return;
        }
    rf.plotWidth = 0;
    rf.plotHeight = 0;
    string[] objs = tr.ReadToEnd().Split(newstring[] { "\r\n" },
StringSplitOptions.RemoveEmptyEntries);
    tr.Close();
    foreach (string obj in objs)
        {
        string[] fields = obj.Split('\t');
        Circle c = new Circle();
            c.Area = float.Parse(fields[areaField], ci);
            c.CX = float.Parse(fields[cxField], ci);
            c.CY = float.Parse(fields[cyField], ci);
            c.Perimeter = float.Parse(fields[perimField], ci);
            c.W = float.Parse(fields[wField], ci);
            c.H = float.Parse(fields[hField], ci);
            rf.plotWidth = Math.Max(rf.plotWidth, c.CX + c.W / 2 + 4);
            rf.plotHeight = Math.Max(rf.plotHeight, c.CY + c.H / 2 + 4);
            rf.circles.Add(c);
        }
    rf.enumerate(trackBar1.Value / 10.0F);
    rf.filename = filename;
    resultList.Add(rf);
    fileList.Items.Add(filename);
    currentView = rf;
    fileList.SelectedIndex = fileList.Items.Count - 1;
}

```



```

        showingDeltas = false;
        pictureBox1.Invalidate();
    }

private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (openFileDialog1.ShowDialog() == DialogResult.OK)
    {
        loadResultsFile(openFileDialog1.FileName);
    }
}

private void pictureBox1_ClientSizeChanged(object sender, EventArgs e)
{
    pictureBox1.Invalidate();
}

private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (showingDeltas)
        return;
    if (currentView != null)
        currentView.enumerate(trackBar1.Value / 10.0F);
    pictureBox1.Invalidate();
}

private void filesList_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (filesList.SelectedIndex >= 0)
    {
        currentView = resultsList[filesList.SelectedIndex];
        showingDeltas = false;
    }
    pictureBox1.Invalidate();
}

private void checkBox1_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    pictureBox1.Invalidate();
}

private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (currentView == null)
        return;
    ResultsFile cur = resultsList[filesList.SelectedIndex],
        @base = resultsList[0],
        @new = new ResultsFile();
    if (cur == @base)
        return;
    if (cur.circles.Count != @base.circles.Count)
    {
        MessageBox.Show("Nesutampa rutuliukų kiekis");
        return;
    }
    @new.plotWidth = @base.plotWidth;
    @new.plotHeight = @base.plotHeight;
    @new.useColors = true;
    @new.circles = newList<Circle>();
    int numColors = listView1.Items.Count;
    Color[] allColors = new Color[numColors];
    foreach (ListViewItem lvi in listView1.Items)
        allColors[lvi.Index] = lvi.BackColor;
    float minDelta = float.MaxValue;

```

```

float maxDelta = float.MinValue;
for (int i = 0; i < @base.circles.Count; i++)
{
    Circle bc = @base.circles[i];
    Circle ac = cur.circles[i];
    Circle nc = newCircle();
    switch (comboBox1.SelectedIndex)
    {
        case 0:
            nc.Delta = 100.0F * (ac.W - bc.W) / bc.W;
            break;
        case 1:
            nc.Delta = 100.0F * (ac.H - bc.H) / bc.H;
            break;
        case 2:
            nc.Delta = 100.0F * (ac.Area - bc.Area) / bc.Area;
            break;
        case 3:
            nc.Delta = 100.0F * (ac.Perimeter - bc.Perimeter) / bc.Perimeter;
            break;
        case 4:
            nc.Delta = 100.0F * (ac.CX - bc.CX) / bc.CX;
            break;
        case 5:
            nc.Delta = 100.0F * (ac.CY - bc.CY) / bc.CY;
            break;
    }
    minDelta = Math.Min(minDelta, nc.Delta);
    maxDelta = Math.Max(maxDelta, nc.Delta);
    nc.CX = bc.CX;
    nc.CY = bc.CY;
    nc.W = bc.W;
    nc.H = bc.H;
    nc.Row = bc.Row;
    nc.Col = bc.Col;
    nc.Index = bc.Index;
    @new.circles.Add(nc);
}
float step = (maxDelta - minDelta) / numColors;
for (int i = 0; i < @base.circles.Count; i++)
{
    int colorIdx = (int)((@new.circles[i].Delta - minDelta) / step);
    if (colorIdx == numColors) colorIdx--;
    @new.circles[i].Color = allColors[colorIdx];
}
currentView = @new;
showingDeltas = true;
pictureBox1.Invalidate();
}

private void listView1_DrawColumnHeader(object sender, DrawListViewColumnHeaderEventArgs e)
{
    e.DrawDefault = true;
}

private void button4_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (colorDialog1.ShowDialog() == DialogResult.OK)
    {
        ListViewItem lvi = new ListViewItem();
        lvi.BackColor = colorDialog1.Color;
        listView1.Items.Add(lvi);
    }
}

```

```

private void listView1_DrawItem(object sender, DrawListViewItemEventArgs e)
{
    e.DrawBackground();
}

private void listView1_ItemActivate(object sender, EventArgs e)
{
    ListViewItem lvi = listView1.SelectedItems[0];
    colorDialog1.Color = lvi.BackColor;
    if (colorDialog1.ShowDialog() == DialogResult.OK)
    {
        lvi.BackColor = colorDialog1.Color;
    }
}

private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
{
    comboBox1.SelectedIndex = 0;
    fileSaveDiffMode.SelectedIndex = 0;
}

private void WriteCSV(string filename, float[][] values)
{
    if (values.Length == 0)
        return;
    TextWriter tw = new StreamWriter(filename);
    foreach (float[] row in values)
        tw.WriteLine(string.Join(";", row.Select(x =>String.Format("{0:0.000}",
x)).ToArray()));
    tw.Close();
}

private void ApplyDiffMode(List<List<float>> data, string mode)
{
    if (mode.Equals("Horizontalus pokytis"))
    {
        foreach (List<float> row in data)
        {
            if (row.Count == 0)
                continue;
            for (int i = 0; i < row.Count - 1; i++)
            {
                row[i] = row[i + 1] - row[i];
            }
            row.RemoveAt(row.Count - 1);
        }
    }
    elseif (mode.Equals("Vertikalus pokytis"))
    {
        int rowLen = data[0].Count;
        foreach (List<float> row in data)
        {
            if (row.Count != rowLen)
            {
                MessageBox.Show("Visos eilutės turi turėti vienodą skaičių taškų");
                data.Clear();
                return;
            }
        }
    }
    for (int row = 0; row < data.Count - 1; row++)
    {
        for (int col = 0; col < rowLen; col++)

```

```

        data[row][col] = data[row + 1][col] - data[row][col];
    }
    data.RemoveAt(data.Count - 1);
}
}

private void button5_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (currentView == null)
        return;
    if (saveFileDialog1.ShowDialog() == DialogResult.OK)
    {
        List<List<float>> data = newList<List<float>>();
        int lastRow = 0;
        List<float> currentRow = newList<float>();
        foreach (Circle c in currentView.circles)
        {
            if (lastRow != c.Row)
            {
                data.Add(currentRow);
                currentRow = newList<float>();
            }

            float value = 0;
            if (showingDeltas)
                value = c.Delta;
            else
            {
                switch (comboBox1.SelectedIndex)
                {
                    case 0:
                        value = c.W;
                        break;
                    case 1:
                        value = c.H;
                        break;
                    case 2:
                        value = c.Area;
                        break;
                    case 3:
                        value = c.Perimeter;
                        break;
                    case 4:
                        value = c.CX;
                        break;
                    case 5:
                        value = c.CY;
                        break;
                }
            }

            lastRow = c.Row;
            currentRow.Add(value);
        }
        if (currentRow.Count > 0)
            data.Add(currentRow);
        ApplyDiffMode(data, fileSaveDiffMode.SelectedItem.ToString());
        WriteCSV(saveFileDialog1.FileName, data.Select(x
x.ToArray()).ToArray());
    }
}

private void checkBox2_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
}
=>

```

```

        pictureBox1.Invalidate();
    }
}

class ResultsFile
{
    public string filename;
    public List<Circle> circles;
    public float plotWidth, plotHeight;
    public bool useColors = false;

    public void enumerate(float threshold)
    {
        if (circles.Count == 0)
            return;
        int crow = 0;
        circles.Sort();
        float lastY = circles[0].CY;
        foreach (Circle c in circles)
        {
            if (c.CY - lastY > threshold)
            {
                crow++;
            }
            c.Row = crow;
            lastY = c.CY;
        }
        circles.Sort(circleRowX);
        int lastCol = 0, lastRow = 0;
        foreach (Circle c in circles)
        {
            if (c.Row == lastRow)
            {
                c.Col = lastCol++;
            }
            else
            {
                c.Col = 0;
                lastCol = 1;
                lastRow = c.Row;
            }
        }
        int idx = 1;
        foreach (Circle c in circles)
        {
            c.Index = idx++;
        }
    }

    private static int circleRowX(Circle a, Circle b)
    {
        if (a.Row < b.Row)
            return -1;
        if (a.Row > b.Row)
            return 1;
        if (a.CX < b.CX)
            return -1;
        if (a.CX > b.CX)
            return 1;
        return 0;
    }
}

class Circle : IComparable

```

```
    {
publicfloat CX, CY, W, H;
publicint Row, Col, Index;
publicfloat Area, Perimeter;
publicfloat Delta;
publicColor Color;

publicint CompareTo(object obj)
    {
Circle other = (Circle)obj;
if (CY < other.CY)
return -1;
elseif (CY == other.CY)
return 0;
return 1;
    }
}
}
```