



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Klijuotų sujungimų vizualizacija, atliekant ultragarsinių
matavimų per orą ir indukcinės termografijos duomenų
apjungimą**

Baigiamasis magistro projektas

Augustas Kievišas

Projekto autorius

Prof. Dr. Elena Jasiūnienė

Vadovė

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Klijuotų sujungimų vizualizacija, atliekant ultragarsinių
matavimų per orą ir indukcinės termografijos duomenų
apjungimą**

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

Augustas Kievišas

Projekto autorius

Prof. Dr. Elena Jasiūnienė

Vadovė

Lekt. Dr. Arturas Aleksandrovas

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Augustas Kievišas

Klijuotų sujungimų vizualizacija, atliekant ultragarsinių matavimų per orą ir indukcinės termografijos duomenų apjungimą

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Augustas Kievišas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Kievišas, Augustas. Klijuotų sujungimų vizualizacija atliekant ultragarsinių matavimų per orą ir indukcinės termografijos duomenų apjungimą. Magistro baigiamasis projektas / vadovė prof. dr. Elena Jasiūnienė; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: duomenų apjungimas, ultragarsiniai matavimai per orą, indukcinė termografija, CFRP, klijuoti sujungimai.

Kaunas, 2022. 52 p.

Santrauka

Šio darbo tikslas yra palyginti klijuotuose sujungimuose esančių inkluzų bei delaminacijos tipo defektų aptikimo efektyvumą pasitelkiant skirtingais bekontakčiais NDT matavimais ir jų duomenų apjungimo algoritmais. Anglies pluoštų sustiprintų polimerinių kompozitų klijuoti sujungimai ištirti oru perduodamo ultragarso ir indukcinės termografijos metodais. Eksperimente tiriami trys defektų variantai į klijuotą sujungimą įterpiant 12,7 mm polimetilpenteno inkluzą, 12,7 mm ir 6,35 mm kraštinės ilgio žalvario plokšteles. Užregistruotiems NDT duomenims atlikti filtravimo, koordinacių bei amplitudžių suderinimo žingsniai. Paruoštiems duomenų šaltiniams pritaikyti standartinių matematinių operacijų (skirtumo, vidurkio, svertinio vidurkio, Hadamarto matricos) ir statistiniai (Dempsterio-Šaferio teorijos) duomenų apjungimo algoritmai. NDT ir duomenų apjungimo matavimo rezultatų įvertinimui nubraižytos sistemos veikimo charakteristikos kreivės ir rastos ploto po kreive absoliutinės vertės.

Kievišas, Augustas. Visualization of Adhesive Joints Using Air-Coupled Ultrasound and Induction Thermography Data Fusion. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Elena Jasiūnienė; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: data fusion, air-coupled ultrasound, induction thermography, CFRP, adhesive joints.

Kaunas, 2022. 52p.

Summary

The aim of this work is to compare the detection effectiveness of inclusions and delamination type defects found in adhesively bonded joints using non-contact NDT methods and different data fusion techniques. Carbon-fiber-reinforced polymer composite bonded joints were investigated with air-coupled ultrasound and induction thermography measurements. Three types of samples were tested with inserted bonded joint interface defects: 12,7 mm polymethyl pentene release film, 12,7 mm and 6,35 mm size brass inclusions. Raw measurement data were preprocessed with denoising, coordinate matching and amplitude normalization steps. Prepared NDT data sets were used for application of standard mathematical (difference, average, weighted average and Hadamard product) operation and statistical (Dempster-Shafer theory) data fusion algorithms. NDT measurement and fusion result effectiveness were evaluated by receiver operating characteristic curves and calculated area under curve values.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Mokslinės literatūros ir informacinių šaltinių analizė	12
1.1. Neardomieji medžiagų tyrimai	12
1.1.1. Neardomieji tyrimai ultragarsu.....	12
1.1.2. Neardomieji matavimai, atliekami indukcinės termografijos metodu	20
1.2. Duomenų apjungimas	23
1.3. Literatūros analizės apibendrinimas	25
2. Tiriamasis objektas, matavimai, duomenų apjungimo eiga ir metodai	26
2.1. Klijuotų sujungimų bandinio aprašas	26
2.2. Ultragarsiniai matavimai per orą	26
2.3. Neardomieji indukcinės termografijos matavimai	28
2.4. Duomenų paruošimas	31
2.5. Duomenų apjungimo algoritmai.....	38
2.6. Duomenų apjungimo algoritmų efektyvumo vertinimas.....	39
3. Rezultatai.....	41
3.1. Tyrimo variantas nr. 1. Sluoksnių atsiskyrimas, įterpiant 12,7 mm kraštinės polimetilpenteno plėvelę.....	41
3.2. Tyrimo variantas nr. 2. Sluoksnių atsiskyrimas, įterpiant 12,7 mm kraštinės žalvario plokštelę	42
3.3. Tyrimo variantas nr. 3. Sluoksnių atsiskyrimas, įterpiant 6,35 mm kraštinės žalvario plokštelę	44
Diskusija	47
Išvados	49
Literatūros sąrašas	50

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Oru perduodamo UG keitiklio dažnių įtaka neardomiesiems matavimams (adaptuota iš [25])	16
2 lentelė. CFRP klijuotų sujungimų tyrimo rezultatas (adaptuota iš [36])	23
3 lentelė. Duomenų apjungimo algoritmai su formulėmis ir aprašais	39
4 lentelė. Bendras ir atskirų tyrimo variantų duomenų apjungimo algoritmų palyginimas.....	47

Paveikslų sąrašas

1 pav. Oru perduodamo ultragarso amplitudės nuostoliai, kintant delaminacijos dydžiui (adaptuota iš [21])	16
2 pav. Aliuminio-epoksido-aliuminio bandinys su įterptais plėvelės inkluzais: (a) bandinio vaizdas iš viršaus, kur kairėje matomi 5 įterpti defektai, o dešinėje geras sujungimas; (b) bandinio schematinis vaizdas iš šono (adaptuota iš [28])	17
3 pav. Oru perduodamo ultragarso siūstuvo-imtovo principu eksperimentinė schema (adaptuota iš [28])	17
4 pav. Oru perduodamo ultragarso matavimo <i>C-scan</i> vaizdas (adaptuota iš [28]).....	18
5 pav. Oru perduodamo ultragarso sistema delaminacijos defektams nustatyti (adaptuota iš [29]).	18
6 pav. CFRP bandinio <i>C-scan</i> vaizdas su įterptais teflono inkluzais (adaptuota iš [29]).....	19
7 pav. CFRP delaminacijos defekto kontūras aptiktas oru perduodamu ultragarsu (adaptuota iš [29])	19
8 pav. Indukcija žadinamo termografijos eksperimento schema (adaptuota iš [31]).....	20
9 pav. Į CFRP struktūrą įtraukti 6 mm, 10 mm ir 15 mm defektai (adaptuota iš [34]).....	21
10 pav. Bandinio šiluminiai vaizdai skirtingais laiko momentais nuo bandinio paveikimu EM lauku: (a) 0,2 s; (b) 0,6 s; (c) 1 s; (d) 2 s; (e) 3 s (adaptuota iš [34]).....	22
11 pav. Užregistruotos galios lyginimas kiekviename CFRP sujungimo sluoksnyje prie skirtingų dažnio ir srovės parametrų konfigūracijų (adaptuota iš [35]).....	22
12 pav. Klijuotų sujungimų bandiniai. A: idealaus sujungimo ir polimetilpenteno inkluzų laminatas, B: bandinys su 12,7 mm ir 6,35 mm dimensijų inkluzais	26
13 pav. Ultragarso matavimo oru atlikimo schema	27
14 pav. Neapdorotas polimetilpenteno plėvelės inkluzų bandinio ultragarso vaizdas.....	27
15 pav. Neapdorotas metalo inkluzų bandinio ultragarso vaizdas	28
16 pav. Indukcinės termografijos matavimo algoritmas	28
17 pav. Sluoksnių atsiskyrimo, su įterptu 12,7 mm polimetilpenteno inkluzu, eksperimento termograma. Vaizdas 5 registravimo sekundėje.....	29
18 pav. Defekto, su įterptu 12,7 mm žalvario inkluzu, eksperimento termograma. Vaizdas 5 registravimo sekundėje	30
19 pav. Defekto, su įterptu 6,35 mm žalvario inkluzu, eksperimento termograma. Vaizdas 5 registravimo sekundėje	31
20 pav. Duomenų paruošimo seka duomenų apjungimo algoritmų realizavimui.....	31
21 pav. Sluoksnių atsiskyrimo, su įterptu 12,7 mm polimetilpenteno inkluzu, termograma, papildomai apdorota PCA technika	32
22 pav. Defekto, su įterptu 12,7 mm žalvario inkluzu, eksperimento termograma papildomai apdorota PCA technika.....	33
23 pav. Defekto, su įterptu 6,35 mm žalvario inkluzu, eksperimento termograma, papildomai apdorota PCA technika.....	34
24 pav. 12,7 mm kraštinės polimetilpenteno plėvelės bandinio UG duomenų paruošimo žingsniai duomenų apjungimui	36
25 pav. Žalvario inkluzų bandinio UG duomenų paruošimo žingsniai duomenų apjungimui	37
26 pav. Defekto centro pozicijų nustatymas: (A) polimetilpenteno plėvelės UG, (B) polimetilpenteno plėvelės TH, (C) 12,7 mm žalvarinio inkluzo UG, (D) 12,7 mm žalvarinio inkluzo TH, (E) 6,35 mm žalvarinio inkluzo UG, (F) 6,35 mm žalvarinio inkluzo UG	38

27 pav. Sluoksnių atsiskyrimo su įterptu 12,7 mm polimetilpenteno inkluzu duomenų apjungimo rezultatai. Realios inkluzų pozicijos pažymėtos raudonais kvadratais: (A) oru perduodamas ultragarsas, (B) indukcinė termografija po PCA apdorojimo, (C) UG ir TH vidurkis, (D) svertinis vidurkis, kai TH svoris 5 kartus didesnis už UG, (E) svertinis vidurkis, kai UG svoris 5 kartus didesnis už TH, (F) UG ir TH skirtumas, (G) Hadamarto matricos algoritmas, (H) DS defekto buvimo hipotezė, (I) DS defekto nebuvimo hipotezė, (J) DS, kai abejonė dėl defekto buvimo yra didelė ...	41
28 pav. Sistemos veikimo charakteristikos kreivės ir AUC skaičiavimų rezultatai. Sluoksnių atsiskyrimas, su įterptu 12,7 mm polimetilpenteno inkluzu.....	42
29 pav. Defekto su įterptu 12,7 mm žalvario inkluzu duomenų apjungimo rezultatai. Realios inkluzų pozicijos pažymėtos raudonais kvadratais: (A) oru perduodamas ultragarsas, (B) indukcinė termografija po PCA apdorojimo, (C) UG ir TH vidurkis, (D) svertinis vidurkis, kai TH svoris 5 kartus didesnis už UG, (E) svertinis vidurkis, kai UG svoris 5 kartus didesnis už TH, (F) UG ir TH skirtumas, (G) Hadamarto matricos algoritmas, (H) DS defekto buvimo hipotezė, (I) DS defekto nebuvimo hipotezė, (J) DS, kai abejonė dėl defekto buvimo yra didelė	43
30 pav. Sistemos veikimo charakteristikos kreivės ir AUC skaičiavimų rezultatai. Defektas su įterptu 12,7 mm žalvario inkluzu	44
31 pav. Defekto su įterptu 6,35 mm žalvario inkluzu duomenų apjungimo rezultatai. Realios inkluzų pozicijos pažymėtos raudonais kvadratais: (A) oru perduodamas ultragarsas, (B) indukcinė termografija po PCA apdorojimo, (C) UG ir TH vidurkis, (D) svertinis vidurkis, kai TH svoris 5 kartus didesnis už UG, (E) svertinis vidurkis, kai UG svoris 5 kartus didesnis už TH, (F) UG ir TH skirtumas, (G) Hadamarto matricos algoritmas, (H) DS defekto buvimo hipotezė, (I) DS defekto nebuvimo hipotezė, (J) DS, kai abejonė dėl defekto buvimo yra didelė	45
32 pav. Sistemos veikimo charakteristikos kreivės ir AUC skaičiavimų rezultatai. Defektas su įterptu 6,35 mm žalvario inkluzu	46

Santrumpų sąrašas

CFRP - anglies pluoštu sustiprintas polimerinis kompozitas (angl. *Carbon-fiber-reinforced polymer*)
NDT - neardomieji matavimai(angl. *Non-destructive testing*)
UG - ultragarsas
DS - Dempsterio-Šaferio teorija
ROC - sistemos veikimo charakteristika (angl. *Receiver operating characteristic*)
AUC - plotas po kreive (angl. *Area under curve*)
SNR - santykis signalas-triukšmas (angl. *Signal-to-noise ratio*)
EMF - elektromagnetinis laukas (angl. *Electromagnetic field*)
IR - infraraudonieji spinduliai
PCA - principinė komponentų analizė (angl. *Principal component analysis*)
TH - termografija
TT - teisingai teigiamas
KT - klaidingai teigiamas
TN - teisingai neigiamas
KN - klaidingai neigiamas
TTA - teisingai teigiamas atsikartojamumas
KTA - klaidingai neigiamas atsikartojamumas

Įvadas

Aviacijoje populiarėja anglies pluoštu sustiprintų polimerinių kompozitų (CFRP) naudojimas, kurie pasižymi didesniu mechaniniu atsparumu ir standumu masės santykiui nei tradicinės orlaivių struktūrinės medžiagos [1]. Įvertinant, jog gamybinės technologijos yra nepajėgios apdoroti pakankamai didelių CFRP medžiagos dalių monolitinei orlaivio struktūrai sudaryti, reikalingas kelių smulkesnių kompozito lakštų sujungimas. Aviacijos industrijoje įgauna pagreitį klijuotų sujungimų pritaikymas, paremtas dviejų medžiagų perdangos zonos užpildymu epoksidinės ar kitos kilmės klijais. Toks sujungimo būdas, skirtingai nei suvirinimas ar tvirtinimo elementų (kniedžių, sraigčių) naudojimas, nepažeidžia kompozitinės medžiagos, lemia mažesnę struktūros svorį ir tolygiai paskirsto apkrovas per visą plotą [2], [3]. Visgi CFRP klijuotų sujungimų eksploatacinės savybės tiesiogiai priklauso nuo klijuoto sujungimo kokybės, kuri negali būti įvertinta vizualiai dėl defektų, tokių kaip delaminacijos, užteršimo svetimkūniais, inkluzais, ir jų pozicijos sujungimo zonoje. Sujungimo defektų nustatymui įprastai atliekami neardomieji matavimai (angl. *Non-destructive testing – NDT*).

Efektyvus sujungimo defektų nustatymas NDT metodais yra sudėtinga užduotis, kadangi atskiros NDT technikos neužtikrina pakankamai aukšto pasikliaujamumo lygio. Be to, svarbu įvertinti ir kiekvieno matavimo metodo eksperimentines sąlygas, tam, kad CFRP medžiagos savybės išliktų nepakeistos, bei laiko išteklius, reikalingus kiekvienam testui atlikti. Šiam tikslui efektyviausi yra kontakto su bandinio paviršiumi nereikalaujantys NDT metodai. Dėl galimos skirtingos kilmės klijuotų CFRP sujungimų defektų (besiskiriančios medžiagos inkluzai) būtų reikšminga neardomuosius matavimus atlikti skirtingais metodais. Tokiu būdu būtų išnaudojami kelių – mokslinėje literatūroje aptartų NDT technikų pranašumai nevienodiems defektų variantams aptikti.

Dviejų ar daugiau NDT metodų matavimų rezultatai klijuotam sujungimui gali skirtis dėl individualių metodų pranašumų tiriant skirtingo tipo defektus. Efektyvesniam ir tikslesniam sprendimo priėmimui dėl numatytoje klijuoto sujungimo zonoje esančio defekto, galima sukombinuoti atskirų NDT matavimų rezultatus. Kelių matavimo technikų rezultatų suliejimas mokslinėje literatūroje vadinamas duomenų apjungimu (angl. *Data fusion*) [4]. Nors egzistuoja aibė NDT rezultatų apjungimo būdų, visų jų pritaikymas vienu metu nėra įmanomas dėl kompiuterinių resursų apribojimo. Todėl šiame projekte iširti populiariausi literatūroje aptarti duomenų apjungimo metodai CFRP klijuotų sujungimų defektų nustatymo aplikacijai, apjungiant oru perduodamo ultragarso ir indukcinės termografijos matavimo rezultatus.

Darbo tikslas – išskirti ir optimizuoti tinkamiausią duomenų apjungimo algoritmą bekontakčių neardomųjų matavimo rezultatų patikimumo pagerinimui tiriant klijuotus sujungimus.

Darbo tikslui pasiekti išskirti uždaviniai:

1. Atlikti literatūros apžvalgą bekontakčio ultragarso ir indukcinės termografijos matavimų bei duomenų apjungimo temomis, siekiant įvertinti efektyviausius NDT matavimų atlikimo metodus ir duomenų apjungimo algoritmus CFRP klijuotų sujungimų patikrai.
2. Sukurti oru perduodamo ultragarso ir indukcinės termografijos matavimo duomenų paruošimo algoritmą duomenų apjungimui.
3. Pritaikyti ir palyginti literatūroje išanalizuotus duomenų sintezės algoritmus.
4. Įvertinti duomenų apjungimu paremtų algoritmų tinkamumą, išskirti optimaliausią algoritmą defektų CFRP klijuotuose sujungimuose aptikimui.

1. Mokslinės literatūros ir informacinių šaltinių analizė

1.1. Neardomieji medžiagų tyrimai

Neardomoji analizė leidžia įvertinti medžiagų vientisumą, vidinius defektus ir priemaišas nepažeidžiant objekto struktūros. Tokiu būdu, tiriamos medžiagos gali būti toliau eksploatuojamos pagal paskirtį [5]. Neardomiesiems tyrimams taikomi įvairūs metodai, kurių taikymas priklauso nuo taikymo srities. Bendru atveju neardomieji tyrimai klasifikuojami į:

- 1) radiologinius metodus: rentgeno, gama spindulių ir neutronų pluošto;
- 2) akustinius ir vibracinius metodus: ultragarso ir mechaninio impedanso matavimus;
- 3) elektrinius ir magnetinius metodus: sūkurinių srovių, magnetinio srauto ir mikrobangų matavimus;
- 4) terminius metodus: infraraudonųjų spindulių radiacijos (termografijos), terminių dažų [6].

Pagrindinis šių neardomųjų tyrimų tikslas – užtikrinti, jog gaminys su numatytu ribinių matmenų ir ypatybių defektais ar inkluzais nebūtų praleidžiama į tolimesnius apdirbimo etapus ar nenukeliautų galutiniam vartotojui. Mažėjant pageidautinų nustatyti neatitikimų medžiagoje matmenims, didėja analizės algoritmo klaidos tikimybė. Daugelyje tokių sistemų, ypač smulkių struktūrinių defektų aptikimo sistemų, dalis užfiksuotų defektų yra klaidingi ir neatspindi realaus neatitikimo medžiagoje. Todėl svarbu įsivardinti kritinius defektų aptikimo kriterijus, kurie pagal reikšmingumo lygį neatitiktų gaminiui keliamų reikalavimų [7].

Renkantis analizės metodą svarbu įvertinti medžiagos mechanines savybes, apimtis ir kokio tipo struktūrinius neatitikimus siekiama aptikti. Medžiagos savybių ir taikomosios aplinkos įvertinimui naudojamos kompiuterinio modeliavimo aplinkos, kuriomis nustatomas efektyviausias struktūrinės analizės būdas. Dažnu atveju medžiagos tūrinių defektų aptikimui taikoma keletas skirtingų neardomųjų tyrimų technologijų. Visgi tai reikalauja papildomos aparatūros ir išlaidų [8].

1.1.1. Neardomieji tyrimai ultragarsu

Ultragarso (UG) – mechaninės bangos, kurių virpėjimo dažnis didesnis nei 18 kHz. Ultragarso taikymas platus ir priklauso nuo bangų intensyvumo. Matavimams įprastai naudojamos mažesnio intensyvumo bangos. Neardomieji tyrimai ultragarsu paremti atspindžiu nuo dviejų akustiškai skirtingų medžiagų. Kuo didesnis akustinio impedanso skirtumas, tuo labiau slopinamos ultragarso bangos. Bangų sklaidimo kelyje susilpnėjusios bangos užregistruojamos keitiklyje.

Ultragarso bangos generuojamos pasitelkus pjezoelektrinį efektą, t. y. – medžiagos savybe generuoti elektrinį krūvį, veikiant ją mechanine apkrova. Pjezoelektrinis efektas yra grįžtamas, abipusis, t. y. veikiant elektriniam laukui juo sugeneruojami ir mechaniniai virpesiai. Įprastai pjezoelektriniu efektu pasižymi kristalinės struktūros medžiagos, praktikoje vadinamomis pjezokristalais. Ultragarso aparatūros keitiklį sudaro dešimtys pjezokristalų. Tokiu būdu stebimas 2D vaizdas. Didesnis pjezokristalų kiekis UG keitiklyje leidžia analizuojamą struktūrą atkurti didesniu tikslumu – aukštesne rezoliucija. Praktikoje dažniausiai išskiriami šeši ultragarso keitiklių tipai:

- 1) statmeni;
- 2) kampiniai;
- 3) fokusuoti;

- 4) su vėlinimo linija;
- 5) imersiniai (nardinamo keitiklio);
- 6) dviejų elementų [9], [10].

UG generavimui pjezoelektrinį keitiklį paveikus aukštos įtampos impulsu sukuriamas trumpas UG bangų pliūpsnis, kurio dažnis priklauso nuo kristalo matmenų (didesnis kristalas pasižymi mažesniu dažniu). Sugeneruotas impulsas sklinda medžiaga, kurioje yra natūraliai slopinamas, tačiau daugiausiai energijos impulsas praranda ties sandūromis su dviem akustiškai skirtingais impedansais pasižyminčiomis medžiagomis. Sandūrų vietos ultragarsinėje vizualizacijoje dažniausiai atvaizduojamos spalvinėje arba pilkumo skalėje (angl. *Greyscale*), kur stebimi šviesesni aukštesnio UG bangų intensyvumo taškai. Paprastai ultragarsinio matavimo metu registruojami šie pagrindiniai parametrai:

- ultragarsinių bangų sklidimo laikas (angl. *Time of travel*);
- bangų silpninimas logaritminėje ar santykinų vienetų skalėje [11].

UG bangų sklidimo laikas tiesiogiai priklauso nuo bandinio išmatavimų ir bangos sklidimo greičio jo struktūroje, kurį veikia medžiagos mechaniniai parametrai. Tuo tarpu UG silpninimas taip pat susijęs su terpės mechaninėmis savybėmis ir vertinamas kaip slopinimo koeficientas. Keitiklyje užfiksuojama UG banga pasižymi mažesniu intensyvumu, lyginant su bangos žadinimo keitiklyje momentu. Šis bangų slopinimas objektyviai įvertinamas pasitelkus pjezoelektrinį efektą, keičiant mechaninį virpesį į elektrinį signalą su sumažėjusia amplitude. Verta paminėti, jog matuojamus silpninimo ir sklidimo laiko parametrus taip pat veikia UG keitiklio dažnis, aplinkos temperatūra ir slėgis [11].

Ultragarso bangų energija keliauja keliais būdais, vertinant bangų sklidimo kryptį ir svyravimų tipą. Dažniausiai naudojami UG bangų sklidimo režimai yra išilginių, skersinių ir paviršinių bangų. Skersinės bangos sklidimo kryptis yra statmena virpesių kryptiai. Šis, bangų sklidimo, režimas galimas tik kietuose kūnuose. Dėl šios priežasties, skersinių bangų režimas plačiai naudojamas inkluzų ar defektų aptikimui medžiagos vidinėse struktūrose [12]. Priešingai, išilginių bangų sklidimas pasižymi lygiagrečia bangų sklidimo ir svyravimo kryptimi. Tai yra greičiausias bangų sklidimo režimas neardomuosiuose matavimuose. Išilginės bangos taikomos bandinio storio ar plonų kūnų matavimuose [13]. UG bangoms atspindžio ar refrakcijos metu išilginės bangos gali virsti skersinėmis ir atvirkščiai. Paviršinės bangos, skirtingai nuo išilginių ar skersinių, osciliavimo būdu sklinda tik medžiagos paviršiumi ir plačiau taikomos medžiagų paviršiaus tyrimams [12].

Neardomųjų matavimų ultragarsu metodika priklauso nuo bandinio, eksperimento aplinkos, taikymo srities, medžiagos paviršiaus, geometrijos, ergonomikos ir kt. Išskiriami trys testavimo metodai:

1. **Impulso aido (angl. *Pulse echo*)**. Naudojamas vienas ar keli keitikliai, esantys toje pačioje tiriamojo objekto pusėje. Bandinys veikiamas trumpais UG bangų impulsais. Vidinėse bandinio struktūrose UG bangos atsispindi nuo sklidimo kelyje atsiradusių kliūčių ar medžiagų sandūrų. Pagal grįžtančio UG impulso laiką įvertinamas pašalinių struktūrų gylis. Matematiškai grįžęs signalas įvertinamas logaritminiu santykiu:

$$IL(db) = 10 \log \left[\frac{E_r}{E_t} \right] - G \quad (1)$$

čia E_r – grįžusio signalo energija, E_t – generuoto signalo energija, G – imtuvo stiprinimas [4].

Pagrindiniai privalumai: užtenka vieno keitiklio ir vienos plokštumos, pakankamai tiksliai nustatomi defektų gyliai ir dydžiai, jų lokacija. Tačiau, turi trūkumų nustatant kliūtis medžiagos vidinėse pozicijose arti paviršiaus.

2. **UG bangų perdavimo (angl. *Through transmission*)**. Naudojami keli keitikliai, išdėstyti skirtingose objekto pusėse siųstuvo-imituvo principu. Perdavimo būdu matuojami UG energijos nuostoliai bangų sklidimo kelyje. Lyginant su impulso aido būdu, UG perdavimu pasiekama geresnė matavimo rezoliucija arti paviršiaus esančioms kliūtims, tačiau netenkama galimybės tiksliai lokalizuoti vidinių struktūrų pozicijų
3. **Rezonansinis (angl. *Resonance*)**. Rezonansiniais virpesiais nustatomas medžiagos storis ir medžiagos sluoksnių sukibimo kokybė. Tam tiktų žingsniu keičiant UG bangų dažnį, į objektą nepertraukiamai paduodamos išilginės UG bangos, kol bandinyje susidaro stovinčios bangos ir sukelia aukštesnės amplitudės vibraciją – rezonansą. Nustačius rezonanso dažnį, žinoma, jog objekto ar sluoksnio storis lygus pusei UG bangos ilgio (arba bangos ilgio kartotinėms reikšmėms)[14].

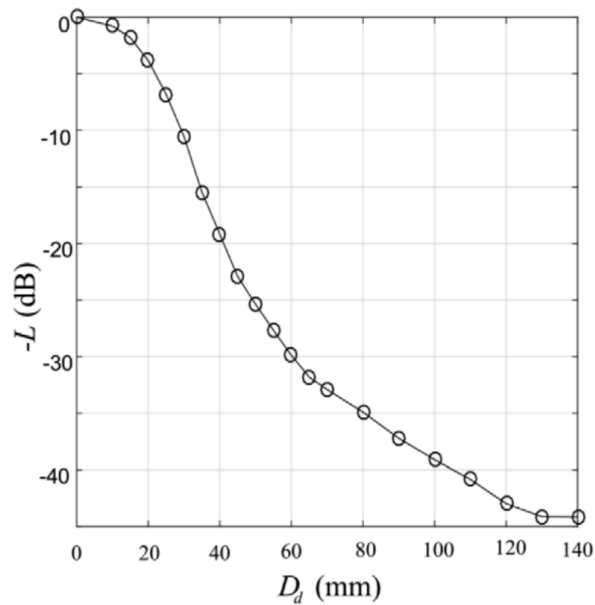
Neardomųjų ultragarsinių matavimų praktikoje svarbu sumažinti pašalinių artefaktų įtaką rezultatui. Vienas iš jų – UG reverberacija nuo bandinio paviršiaus. Aidėjimas nuo objekto paviršiaus matuojant kontaktiniu būdu paprastai atsiranda dėl neidealaus kontakto su keitiklio paviršiumi (tai lemia susidariusius oro tarpus) ar netinkamo keitiklio parinkimo matavimo aplikacijai. Kontakto gerinimui su objekto paviršiumi paprastai naudojami ultragarsiniai geliai skirti akustinio impedanso suderinimui. Taip pat didelę įtaką UG vaizdų kokybei turi ir elektrinio impedanso suderinimas tarp impulsų generatoriaus, keitiklio ir duomenų registravimo įtaiso [15]. Čia nuostoliai atsiranda dėl plačios juostos keitiklių panaudojimo, kurie pasižymi dažniausiai dideliais reaktyviaisiais (talpiniais) impedansais, kai likę įtaisai dažniausiai suderinti prie 50 Ω [16].

Ultragarsiniai duomenys gali būti atvaizduoti skirtingais formatais, kurių yra pagrindiniai trys: *A-scan*, *B-scan* ir *C-scan* vaizdai. Kiekvienas iš jų atkuria UG vaizdus skirtingomis perspektyvomis, įtraukdamas daugiau ar mažiau parametrų [17]. *A-scan* režimas atvaizduoja užregistruotą UG bangų energiją keitiklyje, radijo dažnio signalo forma horizontalioje laiko ašyje. Žinant keitiklio dažnį ir bangų sklidimo terpėje greitį, iš užregistruotų signalo šuolių laike, randamos kliūčių tiriamajame objekte pozicijos, gylio atžvilgiu. Tuo tarpu *B-scan* reprezentuoja tiriamojo objekto pjūvio vaizdą. Čia vertikalioje ašyje spausdinama gylio, o horizontalioje – išilginio bandinio pjūvio arba keitiklio pozicija. Kiekvienose kombinuotose X ir Y koordinačių vietose užregistruojama tam tikra UG signalo energija, kurios vertė *B-scan* vaizde atsispindi spalvų skalėje. *B-scan* vaizdai formuojami iš eilės *A-scan* vaizdų, kurie atliekami tam tikru vienos krypties žingsniu per bandinio paviršių. *A-scan* duomenų panaudojimas vizualizacijoje taip pat būdingas ir *C-scan* formavimui, tačiau matavimai atliekami žingsniais per visą bandinio plokštumos regioną. Tokiu būdu atkuriamas tiriamo objekto struktūros atributų vaizdas plokštumoje. *C-scan* X ir Y ašys nurodo poziciją bandinio paviršiaus atžvilgiu, o pozicijų absoliutinė vertė – *A-scan* matavimo amplitudinę vertę tame matavimo ruože [18].

Pastaruoju metu plačiai tiriama galimybė atlikti UG neardomuosius matavimus bekontakčiu būdu [19]. Lyginant su įprastiniais ultragarso metodais (kontaktinio ar nardinamo keitiklio), oru perduodamas ultragarsas neužteršia tiriamojo objekto paviršiaus ir tinkamas taikyti medžiagoms, kurių tolimesniam naudojimui svarbu, jog jos neturėtų kontakto su kitomis medžiagomis, skysčiais.

Aviacijoje naudojamos anglies pluoštu sustiprintos epoksidinės dervos struktūros yra vienos iš tokių medžiagų, kurioms pritaikomi tradiciniai ultragarsiniai matavimų metodai gali jas apgadinti, neigiamai paveikti kokybę ir mechanines savybes. Todėl atlikti struktūrinę analizę nardinant bandinį į vandenį (nardinamo keitiklio metodas) ar kontaktiniu UG būdu, kur impedanso suderinimui naudojami geliai ir kiti agentai, nerekomenduojama. Be to, naudojant kontaktinius UG matavimo būdais, keitiklio slėgis veikia rezultata bandinio paviršiaus atžvilgiu. Gyekenyesi ir kt. [20] identifikavo 15 % akustinės emisijos rezultato neapibrėžtumą valdant plokščio keitiklio prispaudimo stiprumą 1,5 % preciziškumu. Nustatyta, kad nekontroliuojant slėgio į bandinio paviršių, tokie matavimų nuokrypiai gali išaugti daugiau nei 1000 %. Tai lemtų labai prastą ultragarso matavimo rezultatų atsikartojamumą ir papildomą nuokrypį matavimus atliekant skirtingiems operatoriams. Tuo tarpu Marhenke ir kt. [21], tirdami medienos pagrindo kompozitinius laminatus oru perduodamo ultragarso būdu, pasiekė tik 0,2 % amplitudžių neapibrėžtumą, kartojant matavimus keletą kartų. Dėl šios priežasties bekontaktis NDT metodas turi didelį potencialą klijuotų sujungimų defektų aptikimui.

Oru perduodamo ultragarso metodas turi tam tikrų trūkumų, tokių kaip siauras dažnių juostos plotis, blogas signalas-triukšmas santykis ir žema rezoliucija [22], [23]. Dėl didelės UG atenuacijos akustinių bangų perdavimas oru yra komplikuotas. Mažas oro akustinis impedansas, kuris lyginant su bangų perdavimu vandens terpėje, lemia apie 100 dB signalo nuostolių [24]. Vienas sprendimo būdas - naudoti didesnės galios keitiklius. Kitas būdas yra implementuoti atskirus žadinimo ir registravimo keitiklius dėl didelio siunčiamo ir priimamo signalo amplitudžių skirtumo ir nepakankamos siųstuvo ir stiprintuvo izoliacijos pavieniuose keitikliuose. Vadinas, efektyviausias sprendimas būtų naudoti dviejų keitiklių, veikiančių siųstuvo ir imtuvo principu. Tokiu būdu matavimai atliekami ne ultragarso bangų energijos atspindžio nuo sklidimo kelyje esančių kliūčių principu, bet bangų perdavimo režimu, registruojant nuslopintą akustinių bangų energiją joms prasklidus pro tiriamąjį objektą. Dar vienas svarbus fizikinis faktorius, darantis įtaką bekontakčio ultragarso vaizdų lateralinei rezoliucijai – bangų difrakcija. Šio reiškinio įtaka priklauso nuo delaminacijos defekto dydžio ir bangos ilgio D_d/λ . Difrakcija lemia UG bangų tendenciją skliti mažiausią akustinį impedansą turinčiu keliu – geromis klijuoto sujungimo zonomis bei delaminacijos defektų kraštų perimetrais. Dalis UG energijos užlinksta už nekokybiško sujungimo krašto. Rezultate stebimas kontrasto sumažėjimas tarp gero sujungimo ir delaminacijos zonų. Toks fenomenas ypač stipriai pasireiškia naudojant mažesnio dažnio ultragarsą, tiriant smulkesnio dydžio defektus, kuriuos ultragarsinėje vizualizacijoje tampa itin sunku aptikti [21]. Marhenke ir kt. [21] tyrime nustatyti oru perduodamo ultragarso nuostoliai bangų perdavimo metodu kintant delaminavimo defekto dydžiui (žr. 1 pav.).



1 pav. Oru perduodamo ultragarso amplitudės nuostoliai, kintant delaminacijos dydžiui (adaptuota iš [21])

Kaip matoma 1 pav., defekto maskavimas didžiausias, kai jo diametras yra mažiausias. Be to, difrakcijos efektas išauga kartu su atstumu tarp defekto ir ultragarso bangų imtuvo, todėl storesniuose bandiniuose rezoliucija yra prastesnė. Todėl difrakcijos poveikio mažinimui bangų perdavimo metodu imtuvo keitikli vertėtų laikyti kuo arčiau tiriamojo objekto paviršiaus [21].

Didelę reikšmę bekontakčiam UG oru metodui turi ir dažnių konfigūracija. Įprastai oru perduodamo ultragarso atveju naudojami keitiklio dažniai siekia iki 1 MHz (žr. 1 lentelę).

1 lentelė. Oru perduodamo UG keitiklio dažnių įtaka neardomiesiems matavimams (adaptuota iš [25])

Dažnis	Rezoliucija	Įprastai tiriamos medžiagos	Komentarai
50 kHz	8-10 mm	Storos struktūrinės putos, daugiasluoksniai kompozitai, neapdorota mediena	UG sklinda daugeliu objektų, tačiau matavimas prastos rezoliucijos
120 kHz	5 mm	Sluoksniuotas putplastis, gipso kartonas, vidutinio storio mediena, dviejų ar trijų sluoksnių korinės struktūros	Tinka aplikacijose, kur nereikalinga itin aukšta rezoliucija
400 kHz	1-2 mm	Laminatai, vieno sluoksnio korinės struktūros	Itin aukšta rezoliucija, tačiau ribotas sklindimas didesnių dimensijų kūnais

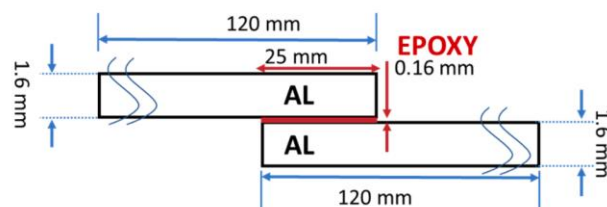
Remiantis 1 lentelės duomenimis, matoma bendra tendencija, jog UG nuostoliai didėja kartu su keitiklio dažniu. Tačiau tiriant daugiasluoksnes kompozitines medžiagas, kurių sluoksnių storis yra sąlyginai mažas, defektų aptikimui reikalingas aukštesnis dažnis.

Pavyzdžiui, J. Peters ir kt. [26] naudoja oru perduodamo ultragarso perdavimo būdą kompozitinėms struktūroms tirti. Nustatyta, jog naudojant nefokusuoto 400 kHz keitiklio dažnį korinėse struktūrose, gera raiška aptinkamų defektų diametras yra 10 mm, o laminatuose nuo 3 mm [26]. Be to, bekontakčio UG vizualizacijų rezoliuciją galima padidinti ir parinkus tinkamą keitikli. Gan ir kt. [27] tyrė itin plonas medžiagas oru perduodamu ultragarsu, bangų perdavimo būdu. Naudojant 1,2 MHz juostos fokusuotą keitikli pasiekta 0,5 mm lateralinė rezoliucija.

Kaip ultragarsiniai matavimai oru prilygsta įprastiniams nardinamo keitiklio, akustinės mikroskopijos ar kontaktiniams matavimams aptaria Ylmaz ir kt. [28]. Straipsnyje aprašomas aliuminio-epoksido-aliuminio lakštų klijuoto sujungimo tyrimas, kurio plote įterpti penki 0,063 mm storio 12,7 mm x 12,7 mm matmenų kvadrato formos „Wrightlon 4600“ plėvelės inkluzai, imituojantys suklijuotų sluoksnių atsiskyrimą. Tyrimo objekto schema pateikta 2 pav.



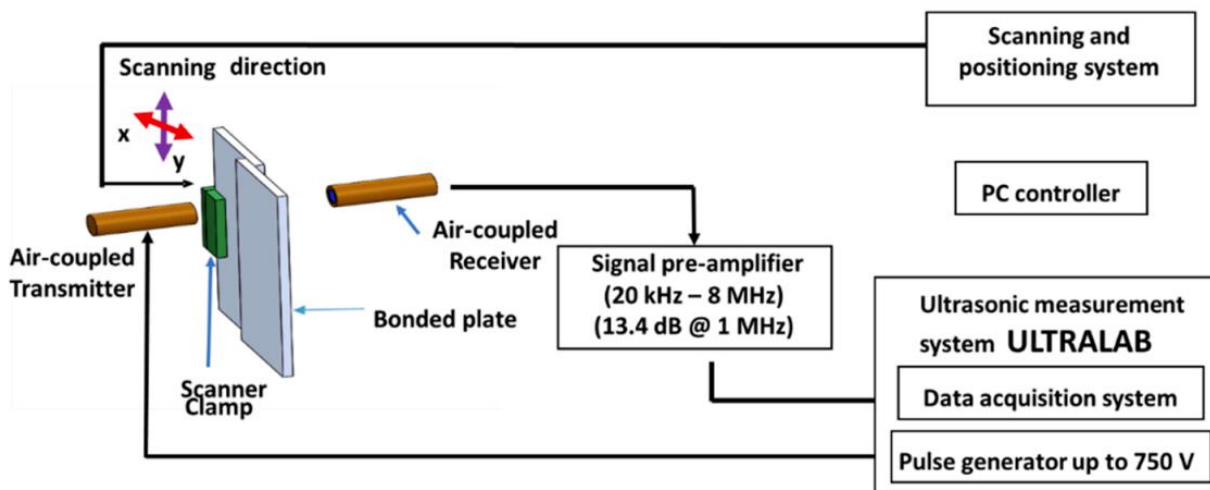
(a)



(b)

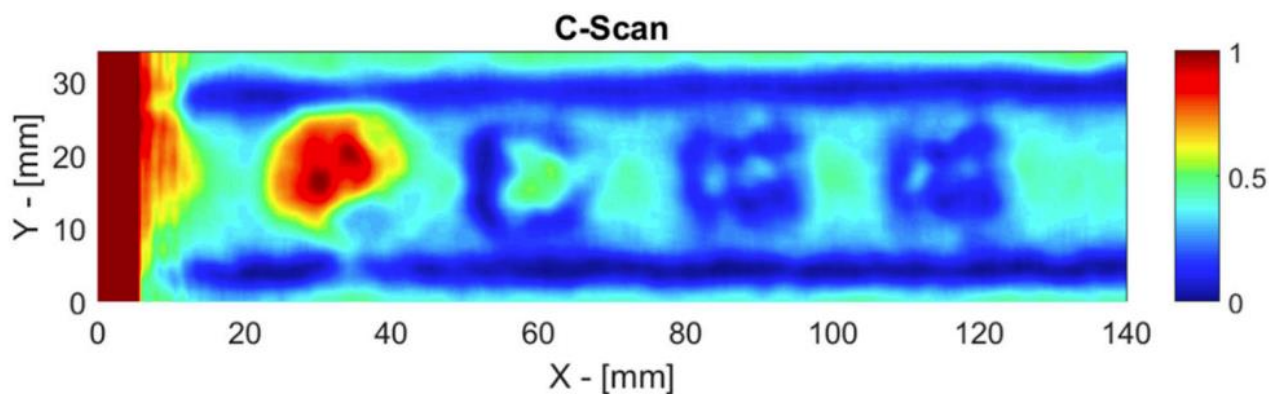
2 pav. Aliuminio-epoksido-aliuminio bandinys su įterptais plėvelės inkluzais: (a) bandinio vaizdas iš viršaus, kur kairėje matomi 5 įterpti defektai, o dešinėje geras sujungimas; (b) bandinio schematinis vaizdas iš šono (adaptuota iš [28])

Oru perduodamo ultragarso eksperimentui naudojamas 300 kHz nefokusuotas vieno elemento keitiklis. Ultragaras žadinamas 750 V stačiakampiais signalais. Keitiklis 0,5 mm žingsniu stumdomas per bandinio paviršių, kol nuskenuojamas visas klijuoto sujungimo perimetras. Vizualus tyrimo planas pateiktas 3 pav.



3 pav. Oru perduodamo ultragarso siųstuvo-imtovo principu eksperimentinė schema (adaptuota iš [28])

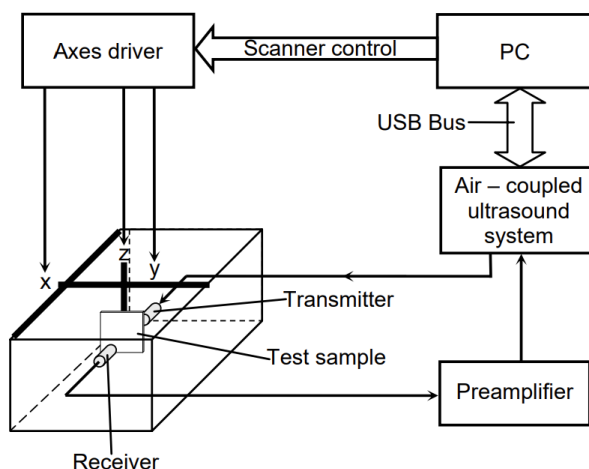
Kiekvienas nuskenotas taškas suvidurkintas 64 kartus, o triukšmų slopinimui signalai apdoroti juostiniu filtru, kurio pjūvio dažniai yra prie 200 Hz ir 500 Hz. Matavimo rezultatas pateiktas 4 pav.



4 pav. Oru perduodamo ultragarso matavimo *C-scan* vaizdas (adaptuota iš [28])

Kaip matoma 4 pav., oru perduodamo ultragarso metodu sėkmingai atkurtos 4 inkluzų struktūros (defektas nr. 1 nematomas, nes keitiklis išlindęs už bandinio ribų – nesusidaro UG bangų sklaidimo barjeras tarp keitiklių, taip gaunamos maksimalios amplitudės). 2 inkluzas iš kairės pasižymi geresne UG bangų pernaša negu gero sujungimo zonos, todėl šio inkluzo rezultato korektiškumas yra abejotinas. Selektviai vertinant inkluzų kokybę, palygintos *C-scan* vaizduose atkurtos inkluzų struktūros su realaus defektų išmatavimais. 3 defektui nustatyta 3,78 % paklaida nuo realaus inkluzo, o 4 ir 5 atitinkamai 26,19 % ir 20,36 %. Nors nuokrypiausiai oru perduodamu ultragarsu yra didesni nei nardinamo keitiklio metodu, pasižymi geresne akustine mikroskopija, tačiau jie yra artimi nukreiptųjų bangų kontaktiniam ultragarso metodui, kurio rezultatai - 0,39, 21,95 ir 24,32 % [28].

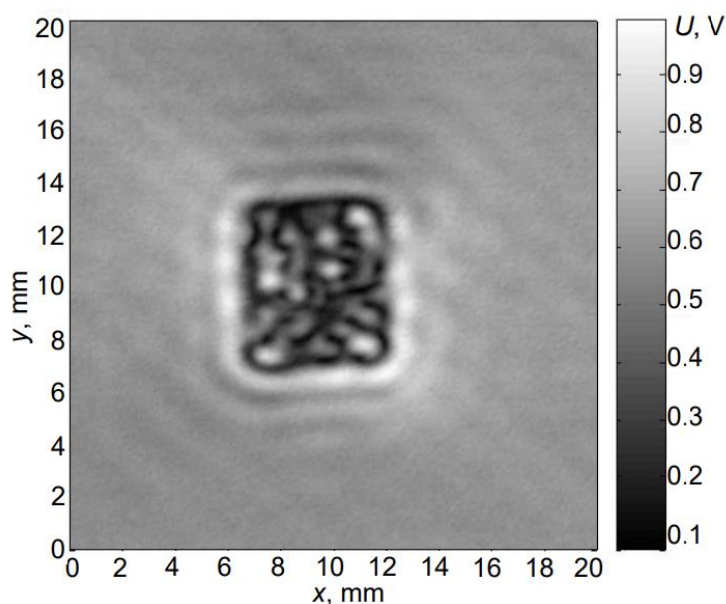
Dar vienas pavyzdys, kaip oru perduodamu ultragarsu nustatomi klijuotų sujungimų delaminacijos tipo defektai ir jų dydžiai, yra pateiktas Žukausko ir kt. [29] tyrime. Darbe yra aprašomi anglies pluoštu sustiprinto plastiko (CFRP) su įtrauktomis dirbtinėmis delaminacijomis, naudojant teflono juostą ir etaloninio bandinio iš 0,6 mm aliuminio lakšto su 6 x 6 mm matmenų kvadratine skyle, bandymai. Eksperimente naudojamą dviejų kanalų oru perduodamo ultragarso sistemą sudaro aukštos įtampos generatorius, mažtatriukšmis stiprintuvas ir keitiklis analogas-kodas. Parinkto keitiklio dažnis – 445 kHz. Matavimas paremtas UG bangų perdavimu per tiriamąjį objektą į keitiklį-imtuvą. Ultragarso sistema valdoma personaliniu kompiuteriu. Struktūrinė eksperimento diagrama pateikta 5 pav.



5 pav. Oru perduodamo ultragarso sistema delaminacijos defektams nustatyti (adaptuota iš [29])

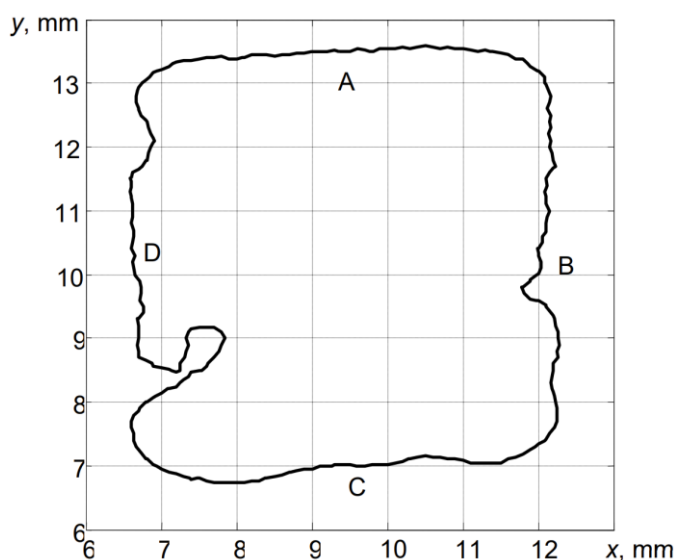
Matavimo sistema suprojektuota taip, jog keitiklis yra stacionarioje pozicijoje ir jo atžvilgiu bandinys yra judinamas per visą paviršių 0,1 mm žingsniu. Skenavimo rezultatai, tiriant CFRP bandinį, pateikti

6 pav. Dėl žemo signalo-triukšmo santykio užregistruotiems signalams kiekviename taške buvo taikoma vidurkinimo operacija.



6 pav. CFRP bandinio C-scan vaizdas su įterptais teflono inkluzais (adaptuota iš [29])

0,5 mm CFRP bandinio gylje esantis teflono defektas bekontakčiu ultragarsu aptinkamas sąlyginai aukštu kontrastu. Visgi matoma, jog UG vizualizacijoje defekto kontūro linija yra iškraipyta. CFRP delaminacijos kontūro linijos vaizdas atkurtas 7 pav., kur B ir D pusėse stebimi kraštinių užlinkimai. Tačiau autorių teigimu, iškraipymai galėjo būti sukelti dėl susidariusio sukibimo tarp teflono juostos ir plastiko. Dėl šios priežasties oru perduodamo ultragarso matavimo tikslumui vertinti, pasirinkta nuokrypius nuo etalono lyginti tarp A ir C pusių [29].



7 pav. CFRP delaminacijos defekto kontūras aptiktas oru perduodamu ultragarsu (adaptuota iš [29])

Nustatyta, jog vidutinis atstumas tarp A ir C kontūro linijų yra 6,52 mm. Žinant, jog realios teflono inkluzo kraštinės ilgis yra 6 mm, apskaičiuotas matavimo nuokrypio vidurkis siekia 8 %. Šis nuokrypio dydis gali būti paveiktas difrakcijos efekto, matavimo metu sukeltos vibracijos, atstumo nuo keitiklio pasikeitimo, žingsniuojant per bandinio paviršių. Visgi įvertinus pašalinius artefaktus

rezultatai rodo, jog sluoksnių atsiskyrimo defektai bei jų matmenys oru perduodamu ultragarsu nustatomi gana tiksliai [29].

1.1.2. Neardomieji matavimai, atliekami indukcinės termografijos metodu

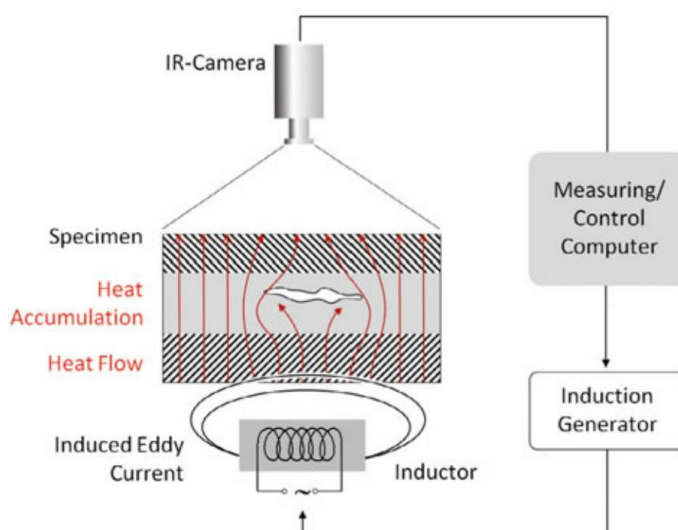
Indukcinė termografija yra neardomasis, bekontaktis matavimas elektros srovei laidžių medžiagų tyrimui ar jų aptikimui. Elektromagnetinių bangų impulsai, generuojami indukcinės ritės, yra paduodami į objekto paviršių, kur generuojamos sūkurinės srovės. Tokiu būdu dėl rezistyvinių (varžinių) ir magnetinės histerezės nuostolių laidžioje medžiagoje generuojama šiluma. Šiluminė spinduliuotė medžiagos paviršiuje aptinkama infraraudonųjų spindulių kamera. Dėl šios priežasties termografiniuose vaizduose matomos metalo priemaišos, inkluzai ar metalinių struktūrų defektai, įtrūkimai. Bendru atveju, galimybė nustatyti defektus pagal matavimo sąlygas vertinama bangų skvarbos gyliu:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu_r \mu_0}} \quad (2)$$

kur f yra dažnis, σ laidumas, μ_r santykinė medžiagos magnetinė skvarba, μ_0 magnetinė skvarba vakuume.

Pagal (2) formulę matoma, jog sūkurinių srovių kelias yra atvirkščiai proporcingas jų svyravimo dažniui. Sugeneruotoms sūkurinėms srovėms skverbiantis gilyn į objekto tūrį, šios pradeda eksponentiškai silpnėti – jų kelias dėl paviršinio efekto yra trumpas. Skvarbos gylis nurodo atstumą nuo laidininko paviršiaus, kai srovės tankis sumažėja iki $1/e$ nuo srovės tankio laidininko paviršiuje ir laikomas pagrindiniu parametru, vertinant indukcinės termografijos matavimo efektyvumą [30].

Dėl didelio efektyvumo ir jautrumo mažo storio bandinių tyrimams, literatūroje indukcinės termografijos metodas paviršiniams ir popaviršiniams defektams aptikti yra plačiai taikomas. Pavyzdžiui, C. Srajbir ir kt. [31] indukcija žadinama termografija atliko klijuotų sujungimų (plieno ir stiklo), naudojamų automobilių pramonėje, kokybės tyrimą. Atliekamo eksperimento struktūrą sudaro indukcijos generatorius, bandinys, infraraudonųjų spindulių kamera (stiklo pusėje), ritė (plieninės dalies pusėje) ir valdymo kompiuteris. Šio tyrimo schema atvaizduota 8 pav.



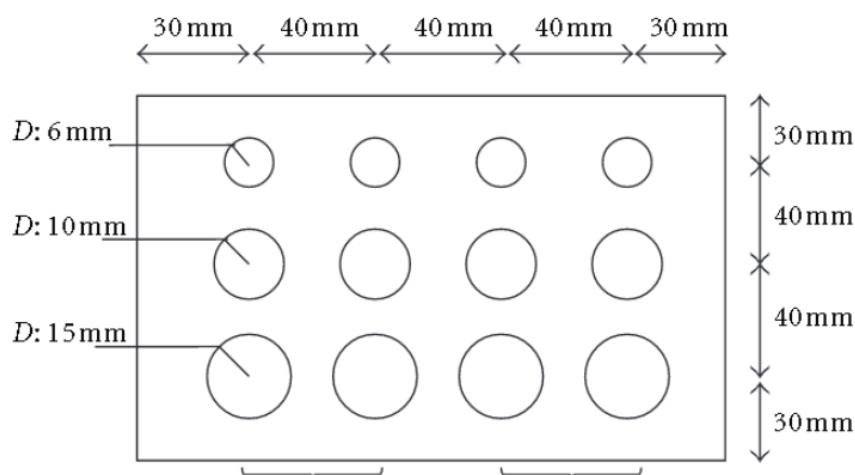
8 pav. Indukcija žadinamo termografijos eksperimento schema (adaptuota iš [31])

Kaip matoma iš eksperimento schemos, tyrime naudojamas šiluminės energijos perdavimo metodas, kai ritės ir kameros pozicija objekto atžvilgiu yra skirtingose pusėse. Elektromagnetinį lauką žadinant 200 ms, 4 kW galios impulsais, matavimai atliekami statinės ir dinaminės indukcijos principais. Rezultatai parodė, jog abiem žadinimo būdais termografiniame vaizde atsispindi medžiagų delaminavimo, porėtumo ir prasto sluoksnių sukibimo defektai [31].

Panaši eksperimento struktūra taikoma ir [32], tačiau čia naudojamas mažesnės galios (1 kW) indukciją žadinantis elementas ir aukštesnio dažnio (150 – 400 kHz) impulsai. Tarp dviejų plieno plokščių, klijų sluoksnyje, įterpti skirtingo dydžio oro tarpai ir pašaliniai inkluzai. Sandūrose su defektais ir inkluzais, termografijos vizualizacijoje pastebėti temperatūrų kontrastai, kurie siekė vidutiniškai 0,67 °C oro tarpų zonose.

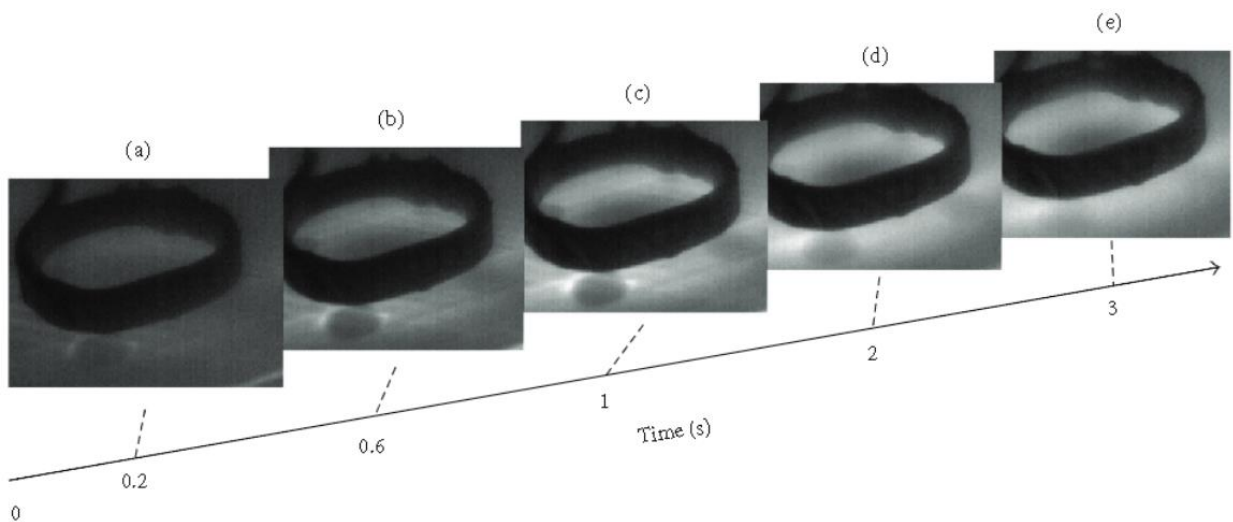
Kadangi šiame projekte koncentruojamasi į kompozitinės, anglies pluoštu sustiprintos epoksidinės dervos, medžiagų tyrimus, vertėtų apžvelgti indukcinės termografijos taikymo rezultatus tiriant paminėto tipo struktūras. Pan ir kt. [33] nagrinėjo, kaip aptinkami delaminacijos defektai tarp CFRP sluoksnių. Straipsnyje teigiama, jog teoriškai dėl kompozitinėje medžiagoje esančio sluoksnių atsiskyrimo susidaręs oro tarpas turėtų termografiniame vaizde atspindėti žemesnės temperatūros zoną. Kadangi indukcijos sukeltas šilimas gerame CFRP bandinyje vysta tolygiai, struktūroje atsiradęs delaminacijos defektas dėl didesnės oro šiluminės varžos kais lėtesniu tempu. Taip pat aušimo fazėje dėl šiluminio inertiškumo delaminacijos vieta ilgiau išlaikys aukštesnę temperatūrą nei gerai suklijuotos CFRP zonos.

Cheng ir kt. [34] tyrė CFPR kompozito delaminavimo defektus indukcinės termografijos būdu, naudojant atspindžio techniką, kai ritė ir infraraudonųjų spindulių kamera yra vienoje tiriamojo objekto pusėje. Į CFPR bandinį įterptos politetrafluoretileno plėvelės dalys, kurių diametrai 6 mm, 10 mm ir 15 mm. Inkluzai įterpti skirtinguose gyliuose: nuo 1 (155 μm) iki 11 (1,55 mm) CFRP medžiagos sluoksnio. Tiriamojo objekto maketas pateiktas 9 pav.



9 pav. Į CFRP struktūrą įtraukti 6 mm, 10 mm ir 15 mm defektai (adaptuota iš [34])

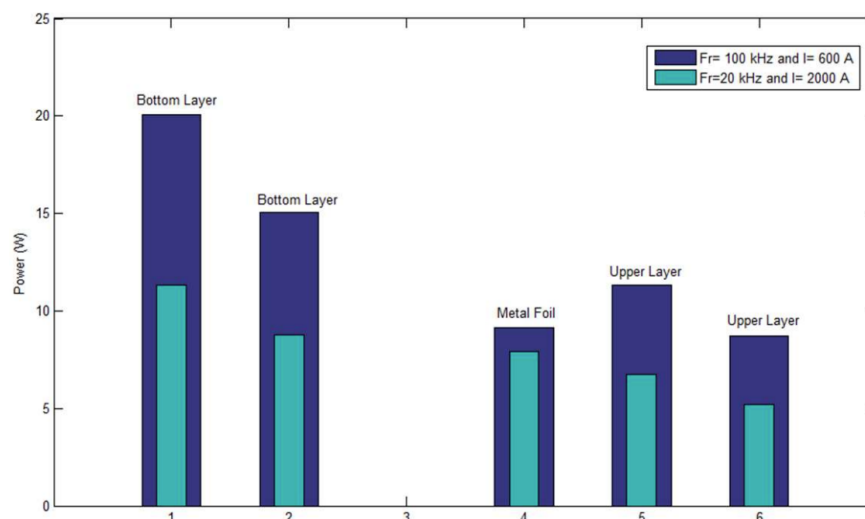
Šiluminio efekto žadinimui bandinyje naudojamas 2 kW HB-X5K aukšto dažnio kaitintuvas, veikiantis 320 kHz dažnyje. Termografijos vaizdas registruojamas 50 Hz IR kamera.



10 pav. Bandinio šiluminiai vaizdai skirtingais laiko momentais nuo bandinio paveikimu EM lauku: (a) 0,2 s; (b) 0,6 s; (c) 1 s; (d) 2 s; (e) 3 s (adaptuota iš [34])

Kaip matoma 10 pav., šilimo ciklo pradžioje (0,2 s) išryškėja 1 sluoksnyje esantis inkluzas (kairėje). Žingsniuojant laiko skale kontrastas 1 sluoksnio defekte padidėja ir pradeda matytis 2 sluoksnio inkluzo kontūras. Maksimalus abiejų defektų kontrastas stebimas ties 1 s, o tolimesniais laiko momentais inkluzų kontūrai pradeda lietis dėl šilumos difundavimo į gretimas zonas. Nors straipsnyje lyginamu ultragarso metodu CFRP defektai aptinkami geriausiai, skenavimo algoritmas užima daug laiko ir kompiuterinių resursų, tuo tarpu termografijos būdai leidžia defektus aptikti praėjus vos sekundės dalims nuo šiluminio efekto žadinimo [34].

Ba ir kt. [35] nustatė, jog didelę įtaką CFRP klijuotų sujungimų defektų aptikimui turi elektromagnetinių bangų dažnis ir šaltinio srovė. Į CFRP sujungimą įterpti metalo folijos inkluzai skleidžia skirtingo dydžio šiluminį efektą, kai yra veikiami $F = 20 \text{ kHz}$, $I = 2000 \text{ A}$ ir $F = 100 \text{ kHz}$, $I = 600 \text{ A}$ parametų konfigūracija. Užregistruotos galios dydis ir efektyvios galios metalo folijoje santykis yra lyginamas visame kompozite ir taip randama optimali konfigūracija.



11 pav. Užregistruotos galios lyginimas kiekviename CFRP sujungimo sluoksnyje prie skirtingų dažnio ir srovės parametų konfigūracijų (adaptuota iš [35])

Pagal 11 pav. temperatūrų pasiskirstymą, matoma, jog 20 kHz atveju viršutiniuose sluoksniuose sukonzentruotas mažesnis galios dydis nei metalo folijos zonoje, tačiau 100 kHz parametų

konfigūracijoje visame kompozite registruojamas didesnis bendras galios dydis, o tai leidžia didesniu kontrastu nustatyti įterptų metalo folijos defektų poziciją.

Dar vienas pavyzdys, kaip indukcinės termografijos matavimai efektyvumu prilygsta analizei ultragarsu, lyginamas Yilmaz ir kt. [36]. CFRP klijuotų sujungimų tyrimas parodė, jog sujungimuose įterpti metalo inkluzai indukcinė termografija aptinkami su aukštu signalas-triukšmas santykiu (SNR), tačiau plėvelės inkluzas, imituojantis sluoksnių atsiklijavimą, užfiksuojamas ženkliai prasčiau. Išsamesnis rezultatas pateiktas 2 lentelėje.

2 lentelė. CFRP klijuotų sujungimų tyrimo rezultatas (adaptuota iš [36])

Tiriamas bandinys	Santykis signalas - triukšmas	
	Ultragarsinis tyrimas	Indukcinė termografija
Atsiklijavimas įterpian plėvele	0,54	0,11
Atsiklijavimas įterpian 12,7 mm žalvario plokštelę	0,54	1,38
Atsiklijavimas įterpian 6,35 mm žalvario plokštelę	0,11	1,12

Lyginant bandinių matavimus indukcinės termografijos būdu su nardinamo keitiklio ultragarsu, matomas akivaizdžiai geresnis rezultatas aptinkant žalvarinių inkluzų pozicijas, tačiau atvirkščias rezultatas gaunamas tiriant bandinį su įterpta plėvele – čia termografinio matavimo SNR siekia tik 0,11 . Toks matavimų rezultatas paaiškinamas prastu įterptos plėvelės elektriniu laidumu, lemiančiu silpnesnes indukuojamas srovės medžiagoje, tokiu būdu ir mažesnę temperatūrinę emisiją [36].

1.2. Duomenų apjungimas

Duomenų apjungimas arba duomenų sintezė (angl. *Data Fusion*) yra kelių duomenų šaltinių rezultatų panaudojimas tikslesnio sprendimo priėmimui. Tai reiškia, jog duomenų sintezės pagalba gali būti pasiekiamas tikslesnis rezultatas nei atliekant atskirus NDT matavimus. Apjungimo algoritmų tikslas yra pagerinti užregistruotos informacijos kokybę iš atskirų matavimo šaltinių. Kelių NDT šaltinių užfiksuota informacija gali būti apdorojama automatiniais apjungimo algoritmais, kurie algebrinėmis ir statistinėmis operacijomis sugeneruoja bendrą matavimų produktą pagal pritaikytą apjungimo algoritmą [37], [38]. Duomenų apjungimo rezultatas tiesiogiai priklauso nuo pritaikomo duomenų apjungimo metodo tinkamumo atliekamiems NDT tipams bei nuo to, ar šaltinių rezultatai neprieštarauja vienas kitam [39]. Priklausomai nuo apjungimo technikos, vienos vertina duomenų šaltinius kaip vienodo reikšmingumo, o kitose konfigūruojama atskiro matavimo įtaka (svoris). Jei tarp NDT matavimo rezultatų stebimas nežymus skirtumas, dažniausiai duomenų apjungimo algoritmų pritaikymas NDT matavimus papildoma ir pagerina defektų aptikimo tikimybę. Kadangi aktualus duomenų sintezės panaudojimas neardomuosiuose matavimuose, apjungimo operacijos atliekamos NDT vaizdų pikselių lygyje [40], [41].

Duomenų apjungimo algoritmų implementavimui svarbu paruošti duomenų šaltinius, juos suderinant. Paruošimą apima šie žingsniai: bendros koordinacių sistemos paruošimas, triukšmų slopinimas ir amplitudžių normalizavimas. Ypač kritiškas yra koordinacių suvienodinimo žingsnis. Pikselio pozicija abiejuose NDT šaltiniuose turi būti kuo artimesnė realios tiriamo objekto struktūros taškui, kitaip apjungimo rezultate sumažėja kontrastas ir padidėja klaidingai teigiamo defekto nustatymo tikimybė [39]. Užregistruoti duomenys dažnai yra triukšmingi ir jiems slopinti pritaikomi

skaitmeniniai filtrai (pvz., slenkančio vidurkio), kurie parenkami priklausomai nuo NDT matavimo tipo [42]. Galutinis etapas – amplitudžių normalizavimas. Kadangi remiamasi skirtingais NDT šaltiniais, jų skalė įprastai skiriasi. Rezultatai perkeliama į vienodą verčių ruožą tarp 0 ir 1.

Kadangi šiuolaikinių kompiuterinių technologijų veikimo sparta didelė, tai leidžia plačiau tyrinėti duomenų apjungimo algoritmų pritaikomumą [43]. Mokslinėje literatūroje aprašoma aibė skirtingų duomenų apjungimo metodų, tačiau tikslinga aptarti algoritmus, taikomus neardomuosiuose matavimuose. Vienas iš plačiai taikomų metodų yra Dempsterio-Šaferio (DS) teorijos. Jis leidžia apjungti kelių šaltinių įrodymus apie pasirinktame taške esantį defektą ir išvesti didesnę pasikliaujamumo laipsnį nei remiantis individualiais šaltiniais. Dempsterio-Šaferio algoritmas teikia didelį privalumą įvertinant matavimų įrodymus apie esančias struktūras pagal bendrai iškeltą hipotezę (defekto buvimą) ir reprezentuojant tam tikrą hipotezės neapibrėžtumo lygį. Be to, DS metodas pasižymi galimybe skaičiavimuose teikti didesnę matematinę svorį aukštesnę reikšmę turinčiam matavimo šaltiniui. Taip pat neardomuosiuose matavimuose populiarus yra Bajeso teoremos modelis, tačiau jis pasižymi apribojimais, kurie nulemia DS pranašumą NDT duomenų apjungime [40]. Bajeso metode svarbios hipotezės pasitvirtinimo tikimybės, o teigiamos hipotezės neremiančios tikimybės laikomos neigiančiomis. Tuo tarpu Dempsterio-Šaferio teorijos technika šaltinių informaciją valdo struktūrizuotai ir ją diferencijuoja tarp defekto nustatymo tikimybių patvirtinimo, neigimo ir neapibrėžties. Be to, Bajeso teorijos implementacijoje naudojamos ankstesnių įvykių tikimybės. Kai pirmykščių duomenų apie defekto poziciją ir mažai arba jos nėra, Bajeso metodo pritaikymas tampa problematiškas [38].

Kitas neardomuosiuose matavimuose populiarus duomenų apjungimo būdas – Hadamarto matricos. Metodas paremtas duomenų šaltinių pikselių daugyba suderintoje koordinačių sistemoje. Tam tikslui dauginamos vertės turi nešti analogišką informaciją (defekto buvimo tikimybė sutampa arba neženkliai skiriasi). Pavyzdžiui, negali būti lyginami NDT matavimai, kuriuose atributų vertės tarpusavio atžvilgiu yra invertuotos (NDT atspindžio ir perdavimo metuose). Tokiu atveju, kai tarp neinvertuotų šaltinių išvedamas rezultatų prieštaravimas, naudojant Hadamarto techniką prarandama dalis informacijos. Todėl šis algoritmas efektyviausias tarp panašių defektų aptikimo galimybių turinčių neardomųjų matavimų metodų [39].

Literatūroje gerais rezultatais pasižymi ir metodai, sujungiant duomenis įprastomis matematinėmis funkcijomis – vidurkio, svertinio vidurkio ir skirtumo. Skirtumo metodas vertina absoliutinį skirtumo modulį tarp NDT šaltinių. Skirtumo technikoje skaičiavimai paremti to paties koordinačių taško pikselių atimtimi tarp duomenų šaltinių. Vidurkio metodas sulieja vienodo reikšmingumo matavimų rezultatus. Ši technika turi pranašumą, kai yra riboti kompiuteriniai resursai ir nėra informacijos apie NDT rezultatų patikimumą. Visgi jei yra žinoma, jog vieno iš matavimo šaltinių rezultatai turi aukštesnę pasikliaujamumą, efektyvesnis būtų svertinio vidurkio metodas, priskiriant patikimesniam rezultatui didesnę matematinę svorį. Cotič ir kt. [44] tyrė betono blokus dėl paviršinių defektų aukšto dažnio radaro ir stačiakampių impulsų termografijos metodais. Gautus matavimų rezultatus apjungiant Dempsterio-Šaferio bei svertinio vidurkio algoritmais ir bandinius klasifikuojant į gerus ir defektuotus nustatyta, jog abu metodai pasižymi panašiu efektyvumu [44].

Bendrai, pritaikytų duomenų apjungimo algoritmų efektyvumą galima nustatyti keliais būdais. Vienas jų – vizualiai, stebint apjungto duomenų vaizdo atributų ir defektų kontrastą. Kitas – sistemos veikimo charakteristikos kreivėmis (angl. *Receiver operating characteristic – ROC*). ROC kreivėmis apibūdinamos algoritmų tikimybės teisingai ir klaidingai nustatyti defekto poziciją tiriamoje

struktūroje. Tikimybės nustatomos apjungto algoritmo rezultato lyginimu su etaloniniu pavyzdžiu. Etalono vaizde sukuriama realią poziciją atitinkantys defektai, kurių amplitudės priskiriamos maksimumui (1), o likusios zonos minimumui (0). Sistemos veikimo charakteristika lyginamos apjungimo algoritmo defekto vietos amplitudės su etalonu, taip pat, vertinama ir zona ne defekto ribose klaidingai nustatytų defektų užregistravimui. Nors ROC kreivės objektyviai atspindi apjungimo algoritmo patikimumą, efektyvumo vertinimą galima supaprastinti randant ploto po kreivę parametą (angl. *Area under curve* – *AUC*). *AUC* reprezentuoja klasifikavimo patikimumo vertinimą (defektas yra ar jo nėra). Šiuo dydžiu nurodoma sistemos tikimybė teisingai atskirti argumentą tarp iškeltų teigiamų ir neigiamų hipotezių. Kuo *AUC* vertė artimesnė 1 – tuo duomenų apjungimo algoritmas yra patikimesnis nustatant realią defekto poziciją tiriamajame objekte.

1.3. Literatūros analizės apibendrinimas

Atlikus literatūros šaltinių analizę palyginti indukcinės termografijos ir ultragarsinių matavimų per orą eksperimentų atlikimo metodai delaminavimo ir sluoksnių atsiklijavimo tipo defektams nustatyti. Bekontakčio ultragarso metodas kompozitinių medžiagų patikrose pasižymi pakankamai geru tikslumu delaminacijos defektų atvaizdavime. Pagal projekte tiriamo objekto tipą (CFRP lakštų klijuoti sujungimai) nustatyta, kad oru perduodamo ultragarso matavimams efektyviausia naudoti keitiklius, kurių dažniai artimi 400 kHz dėl pakankamai mažo bandinio storio ir aktualumo aptikti vidines struktūras kuo aukštesne rezoliucija. Be to, geresniam signalas-triukšmas santykiui tyrime optimalu pritaikyti dviejų keitiklių sistemą, veikiančią siųstuvo-imtuvo principu. Indukcinės termografijos matavimų defektų aptikimo kontrasto didinimui tikslinga naudoti aukštesnio dažnio, tačiau mažesnės žadinimo srovės parametrų konfigūraciją. Lyginant su 20 kHz indukcija žadinančiu šaltinio dažniu, 100 kHz šaltinio dažnis lemia efektyvesnę galios išnaudojimą tiriant CFRP klijuotus sujungimus. Taip pat svarbu įvertinti, jog indukcinės termografijos NDT metodas yra tikslesnis metalo ir kitų laidžių medžiagų inkluzų aptikimui klijuotose struktūrose.

Nustatyta, jog duomenų apjungimui svarbu atlikti tokius duomenų paruošimo žingsnius kaip triukšmų slopinimą, koordinacijų ir amplitudžių suderinimą. Duomenų apjungimo algoritmų efektyvumui daro įtaką atliktų NDT matavimų metodų parinkimas, užregistruotų duomenų kiekis ir matavimo šaltinių rezultatų prieštaravimo laipsnis. Objektyviam duomenų apjungimo technikų našumo įvertinimui projektuojamos sistemos veikimo charakteristikos kreivės bei skaičiuojamas ploto po kreivės parametro absoliutinis dydis.

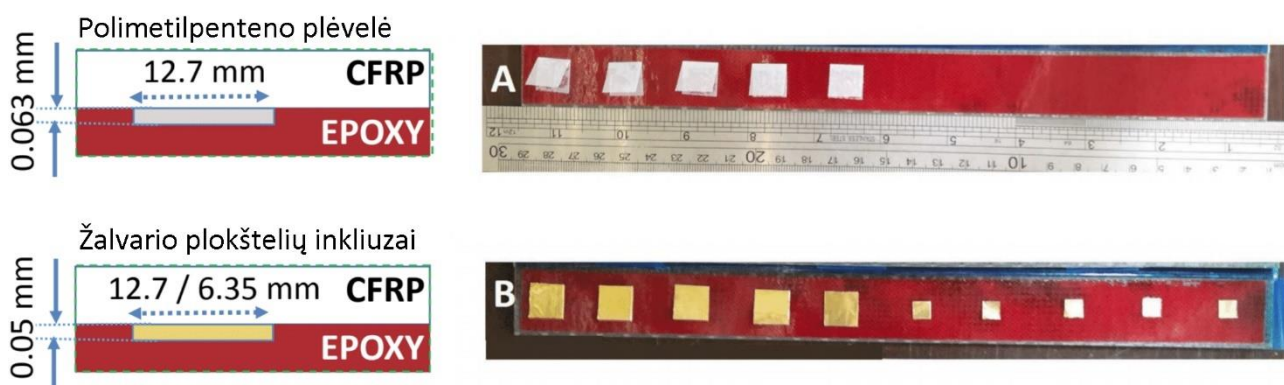
2. Tiriamasis objektas, matavimai, duomenų apjungimo eiga ir metodai

2.1. Klijuotų sujungimų bandinio aprašas

Tiriamos dvi klijuotų sujungimų šešių sluoksnių anglies pluoštu sustiprintos epoksidinės dervos struktūros (CFRP) sujungtos epoksidine plėvele, kurių matmenys 120 x 180 mm. Sujungimų plotis – 25 mm. Skirtingai sujungimų kokybei imituoti vidiniuose medžiagos sluoksniuose suprojektuoti trys tyrimo variantai:

- 1) sluoksnių atsiskyrimas, įterpiant 12,7 x 12,7 mm matmenų ir 0,063 mm storio polimetilpenteno plėvelę, taip imituojant delaminacijos tipo defektą;
- 2) sluoksnių atsiskyrimas, įterpiant 12,7 x 12,7 mm matmenų ir 0,05 mm storio žalvarines plokšteles;
- 3) sluoksnių atsiskyrimas, įterpiant 6,35 x 6,35 mm matmenų ir 0,05 mm storio žalvarines plokšteles.

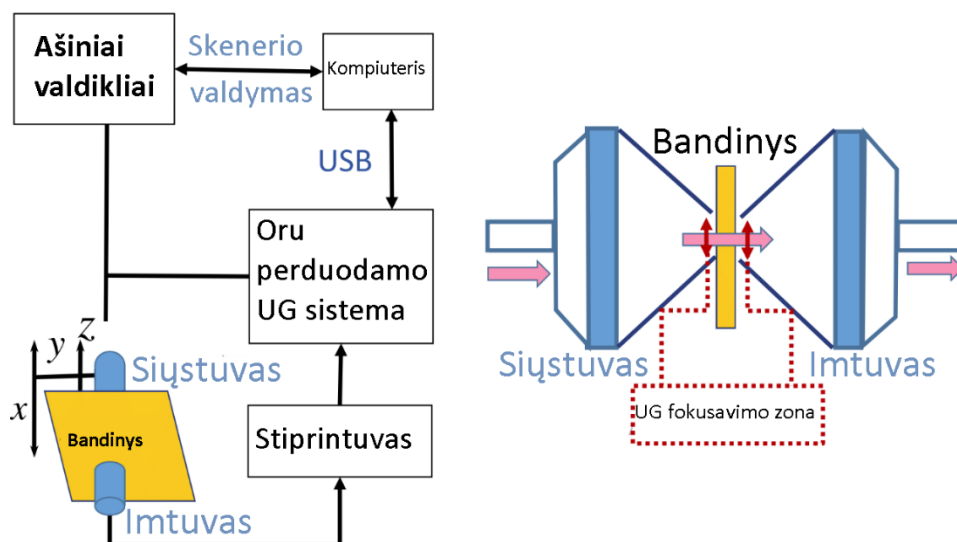
Reali bandinių struktūra pavaizduota 12 pav.



12 pav. Klijuotų sujungimų bandiniai. A: idealaus sujungimo ir polimetilpenteno inkluzų laminatas, B: bandinys su 12,7 mm ir 6,35 mm dimensijų inkluzais

2.2. Ultragarsiniai matavimai per orą

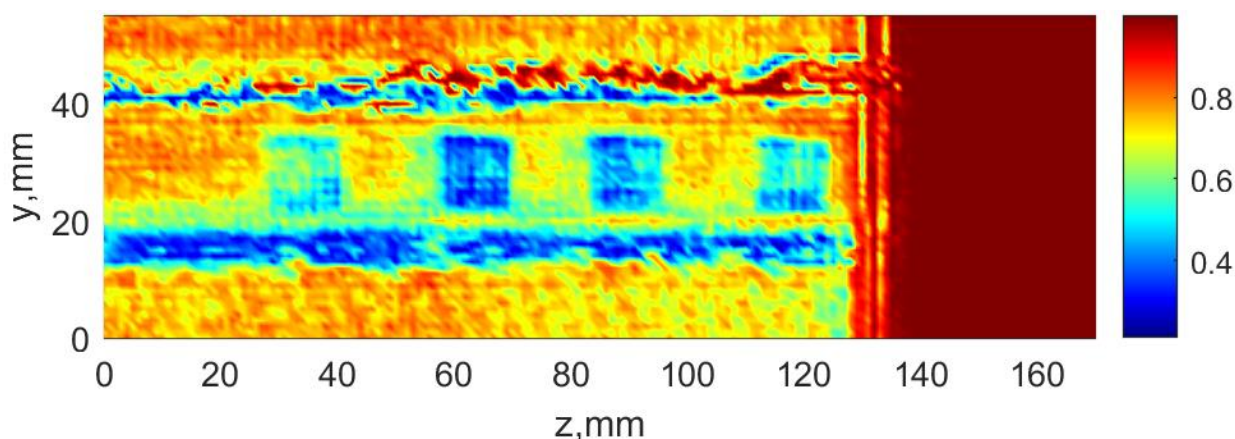
UG bangų žadinimui naudojamas 450 kHz fokusuotų bangų keitiklis (pagamintas Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institute, Kauno Technologijos Universitete). Matavimas paremtas UG bangų perdavimo principu, todėl matavimui reikalingi atskiri UG siuntimo ir priėmimo keitikliai. Keitikliai išdėstyti skirtingose pusėse nuo objekto nutolę vienodais atstumais, tarpusavyje - 86 mm atstumu (2x artimo lauko nuotolis). Matavimui realizuoti taikoma „Ultralab“ ultragarso sistema. Žadinimo signalui naudojamas 10 periodų 750 V amplitudės stačiakampio formos signalas. Gautam signalui taikomas pradinis 50 dB statinis ir 40 dB dinaminis stiprinimas. Triukšmų sumažinimui atliekamas vidurkinimas, 64 kartus kiekvienam skenavimo taškui. Matavimo algoritmas vizualiai pateiktas 13 pav.



13 pav. Ultragarso matavimo oru atlikimo schema

C-Scan vaizdams generuoti keitiklio pozicija ašinių valdiklių pagalba kiekviename skenavimo cikle paslenkama 1 mm.

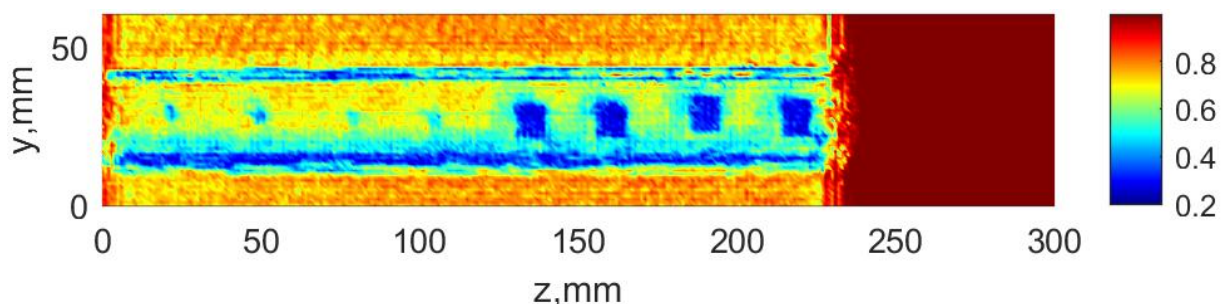
Iš oru perduodamo ultragarso eksperimento duomenų atliekamas UG vaizdų formavimas. Duomenys surinkti išmatavus A-scan vertes, skenuojant 1 mm žingsniu per bandinio paviršių. Tiriamojo objekto atžvilgiu atlikti 301 X ir 61 Y žingsniai metalo inkluzų, 171 X ir 56 Y žingsniai sluoksnių atsiklijavimo matavimo atveju, todėl pirminis vaizdas bus sudarytas iš šių X ir Y koordinatijų kombinacijų matricos. Kiekvieno segmento skenavime surenkama 3500 UG duomenų, kurių kiekį lemia matavimo sistemos diskretizavimo dažnis. Ultragarstinė aparatūra registruoja duomenis sveikaisiais skaičiais, kurios maksimali vertė gali siekti iki 1024. Gautas duomenų masyvas sunormuojamas. Toks matematinis skaičiavimas atliekamas kiekvienoje UG keitiklio pozicijoje. Išmatuoto taško vertė svyruoja tarp 1 ir 0. Iš šių verčių sudaroma ultragarstinė vizualizacija, kurios amplitudinės vertės atvaizduojamos spalvinėje skalėje (žr. 14 ir 15 pav.).



14 pav. Neapdorotas polimetilpenteno plėvelės inkluzų bandinio ultragarso vaizdas

Oru perduodamo ultragarso matavimuose, stebimi polimetilpenteno inkluzai (žr. 14 pav.) pasižymi geru kontrastu, vizualiai nesunkiai aptinkami defekto kontūrai. Įterptas plėvelės sluoksnis dėl akustinio impedanso skirtumo tarp sluoksnių susilpnina tolimesnę bangų transmisiją bandiniu, todėl defektų zonose stebimi UG energijos minimumai. Rezultate akivaizdžiai išsiskiria ir sujungimo

krašto pėdsakai. Žinant realius bandinio atributų matmenis šie duomenys palengvins tolimesnį UG duomenų apdorojimą

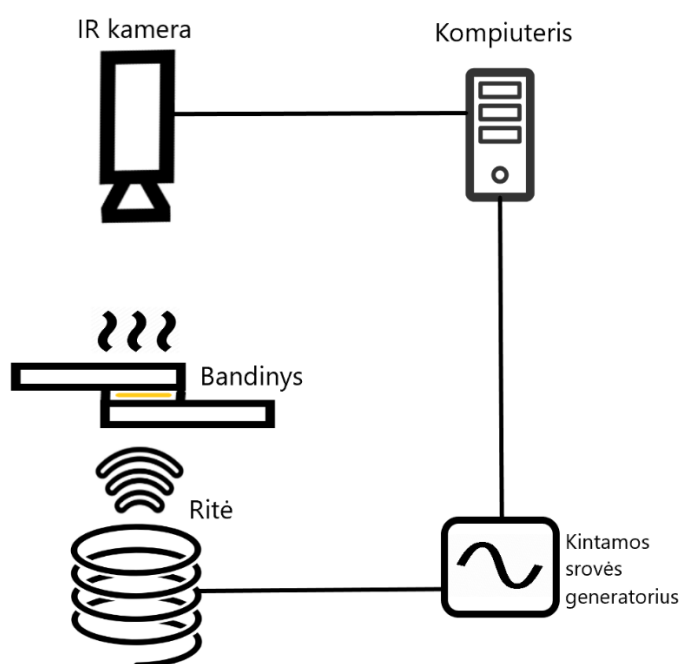


15 pav. Neapdorotas metalo inkluzų bandinio ultragarsinis vaizdas

Metalo (žalvario) inkluzų bandinyje (15 pav.) vizualiai išsiskiria 12,7 mm defektai, kurių paviršius atspindi didžiąją dalį UG energijos. Tuo tarpu 6,35 mm inkluzai pasižymi blogesniu kontrastu analizuojamame objekte. Visgi toks rezultatas tikėtinas, kadangi vaizdo rezoliucija yra pakankamai žema, o 6,35 mm defekto paviršiaus plotas yra 4 kartus mažesnis, lyginant su 12,7 mm inkluzu.

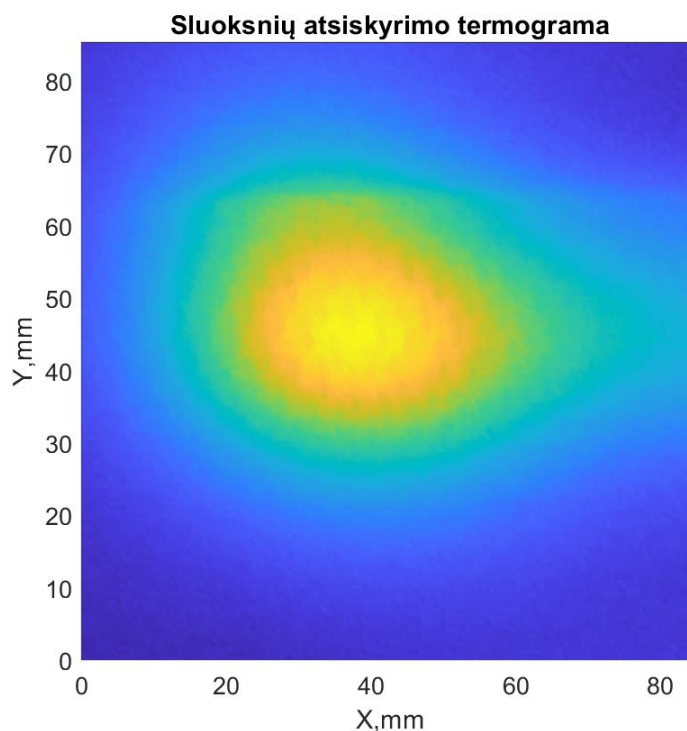
2.3. Neardomieji indukcinės termografijos matavimai

Klijuoti sujungimai tiriami indukcinės termografijos metodu, kur laidžiųjų medžiagų šiluminė emisija inicijuojama sūkurinių srovių panaudojimu. Geresniam signalas-triukšmas santykiui (SNR) pasiekti, matavimams parinktas spiralinė ritės dizainas. Ritės matmenys: vidinis diametras 15 mm, išorinis diametras 25 mm, aukštis 30 mm, apskirimų skaičius – 5. Elektromagnetinis laukas (EMF) ritėje žadinamas 200 A srove 1 sekundę. Generuojamo EMF dažnis – 105 kHz. Šiluminis EMF poveikis bandiniams registruojamas infraraudonųjų (IR) spindulių kamera. IR kameros pozicija ritės atžvilgiu yra priešingoje bandinio pusėje (analogiškai 2.2 skyriuje aprašytiems oru perduodamo ultragarso matavimams). Tokiu būdu šiluminė emisija bandinio paviršiuje fiksuojama 25 kadrų per sekundę dažniu, 60 sekundžių. Atlikto matavimo schema pateikta 16 pav.



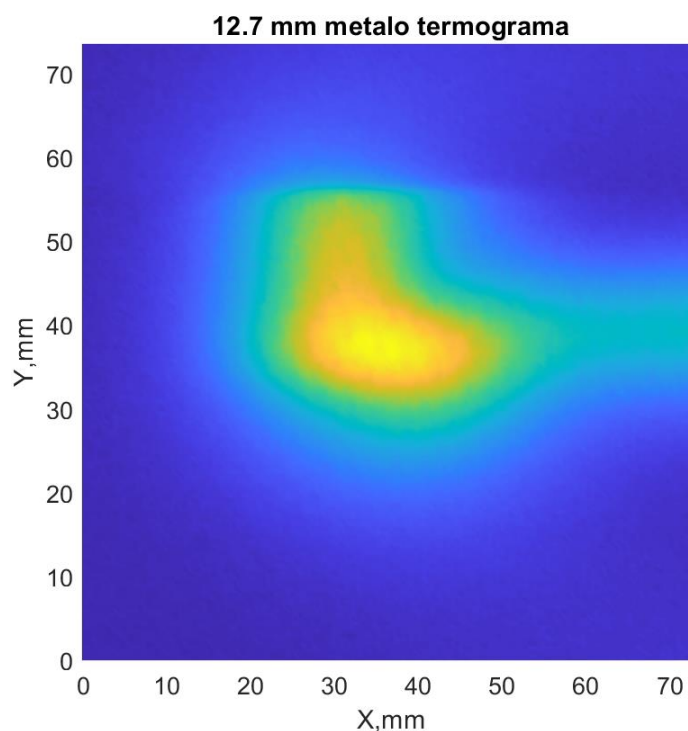
16 pav. Indukcinės termografijos matavimo algoritmas

Indukcinės termografijos matavimo metu atskiro vaizdų formavimo atlikti nereikia. Šiluminis efektas užregistruojamas infraraudonųjų spindulių kamera, kur termogramos vaizdas yra paruošiamas automatiškai. Užfiksuoti termografijos vaizdai pateikti 17, 18 ir 19 pav.



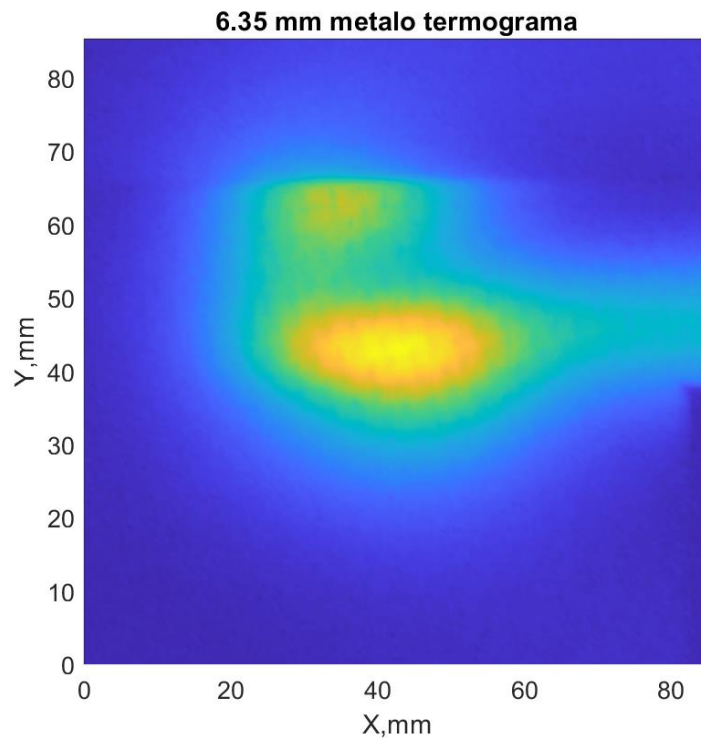
17 pav. Sluoksnių atsiskyrimo, su įterptu 12,7 mm polimetilpenteno inkliuzu, eksperimento termograma.
Vaizdas 5 registravimo sekundėje

17 pav. pateiktuose indukcinės termografijos matavimo rezultatuose stebimas elektromagnetinio lauko sukeltas šiluminis efektas. Neapdorotas vaizdas atkuria keletą kartų didesnę temperatūrinę emisijos regioną nei realaus įterpto inkliuzo dydis. Tai parodo, jog indukcijos sukeltas šilumos efektas perduodamas į aplinkines klijuoto sujungimo zonas. Kadangi polimetilpenteno, kaip ir kitų termoplastikų, elektrinis laidumas yra prastas, šiluminis efektas rezultate yra minimalus. Visgi IR kamera optimizuoja paviršių temperatūras spalvinėje skalėje taip, kad pagerinamas defektuoto regiono kontrastas, tačiau dėl padidinto jautrumo į termografijos vaizdą įnešama triukšmų.



18 pav. Defekto, su įterptu 12,7 mm žalvario inkluzu, eksperimento termograma. Vaizdas 5 registravimo sekundėje

18 pav. atkurta termograma penktoje eksperimento sekundėje akivaizdžiai atspindi 12,7 mm metalo inkluzo reakciją į indukuojamą el. srovę klijuoto sujungimo struktūroje. Aukščiausios amplitudės zona lokalizuota ties bandinio centru, kur x ašis yra ties antru defektu nuo centro taško. Nors defekto zonoje stebimi maksimumai, dėl inkluzo sklaidžiamos šilumos, kaitinamos ir gretutinės defekto zonos. Tai nulemia vizualiai neapibrėžiamą inkluzo kontūrą, kas daro įtaką realaus defekto zonos aptikimui. Čia, priešingai nei sluoksnių atsiskyrimo su įterpta plėvele vizualizacijoje, IR kameros jautrumas yra mažesnis dėl gero žalvarinio elektrinio laidumo, didesnio bandinio paviršiaus, kur lokalizuotas inkluzas, ir temperatūros skirtumo nuo aplinkinių zonų. Dėl šios priežasties neatkuriama klijuoto sujungimo krašto linija.

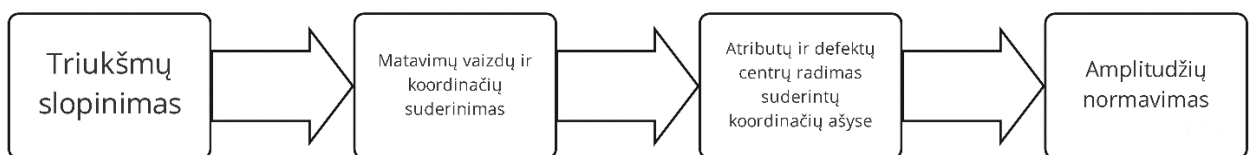


19 pav. Defekto, su įterptu 6,35 mm žalvario inkluzu, eksperimento termograma. Vaizdas 5 registravimo sekundėje

6,35 mm kraštinės metalo atveju (žr. 19 pav.) šiluminio efekto maksimumų zona yra mažiausia. Čia, kaip ir kitų užregistruotų termogramų vaizduose inkluzo kontūro linija nėra apibrėžta ir šiluminis efektas perduodamas į geras klijuoto sujungimo zonas horizontalia kryptimi, kurioje yra išdėstyti inkluzai.

2.4. Duomenų paruošimas

Duomenų paruošimas apjungimui pikselių lygyje apima tam tikrą spektrą veiksmų, tokių kaip triukšmų mažinimas taikant filtravimą, skirtingų matavimų kanalų koordinatžių ir duomenų derinimas vaizdų suvienodinimui, defekto zonos nustatymas, amplitudžių normavimas (20 pav.).



20 pav. Duomenų paruošimo seka duomenų apjungimo algoritmų realizavimui

Duomenų paruošimas ir apjungimo algoritmų implementavimas atliekamas *Matlab* programinės įrangos pagalba.

Kadangi pirminiame UG vaizde atkuriamas nemaža dalis nenaudingos informacijos, matricos rėžiai yra sumažinami taip, kad apkarpytas vaizdas atkurtų tik su tiriamuoju objektu susijusią informaciją (24 pav. A, 25 pav. A).

Filtravimas

Triukšmu užteršti atkurti matavimų vaizdai yra filtruojami dėl duomenų registravimo metu įneštų pašalinių artefaktų. Indukcinės termografijos ir oru perduodamo ultragarso matavimams dėl

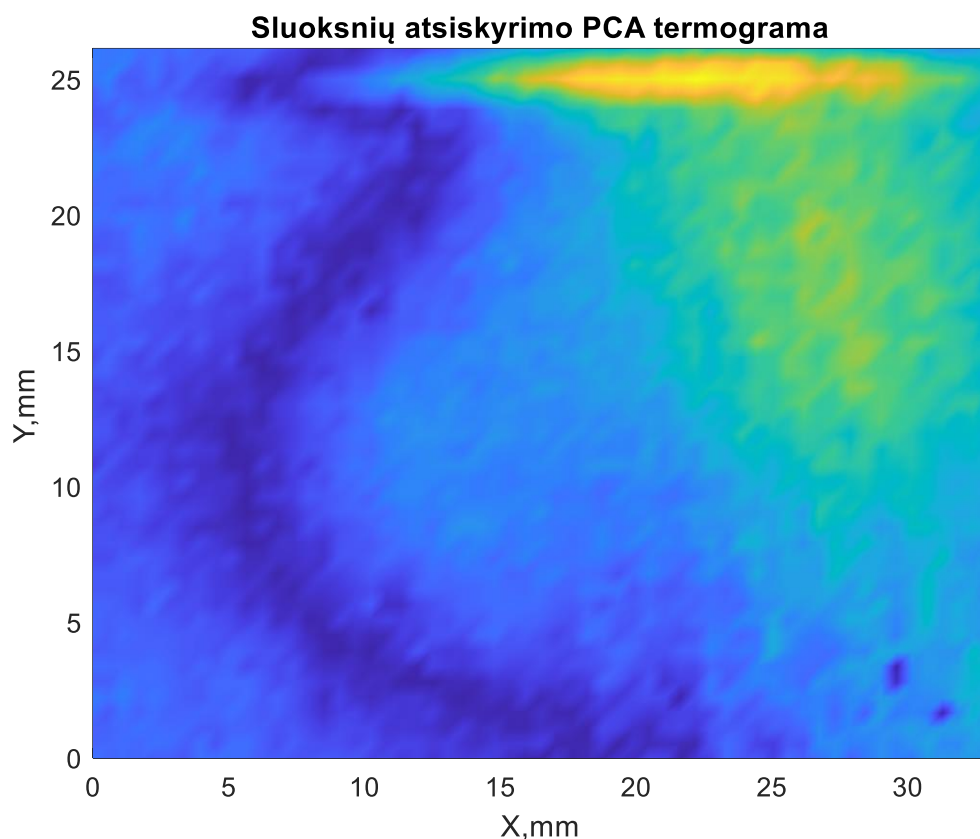
besiskiriančios duomenų kilmės taikomi skirtingi filtravimo metodai. Aukštų dažnių triukšmų slopinimui oru perduodamo ultragarso duomenys apdoroti “Wavelet“ funkcija. Indukcinės termografijos matavimų SNR gerinimui pritaikomas ribotos impulsinės reakcijos Gauso filtras:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/(2\sigma^2)}, \quad (3)$$

kur σ yra standartinis nuokrypis.

Principinės komponentų analizės taikymas indukcinės termografijos matavimų rezultatams

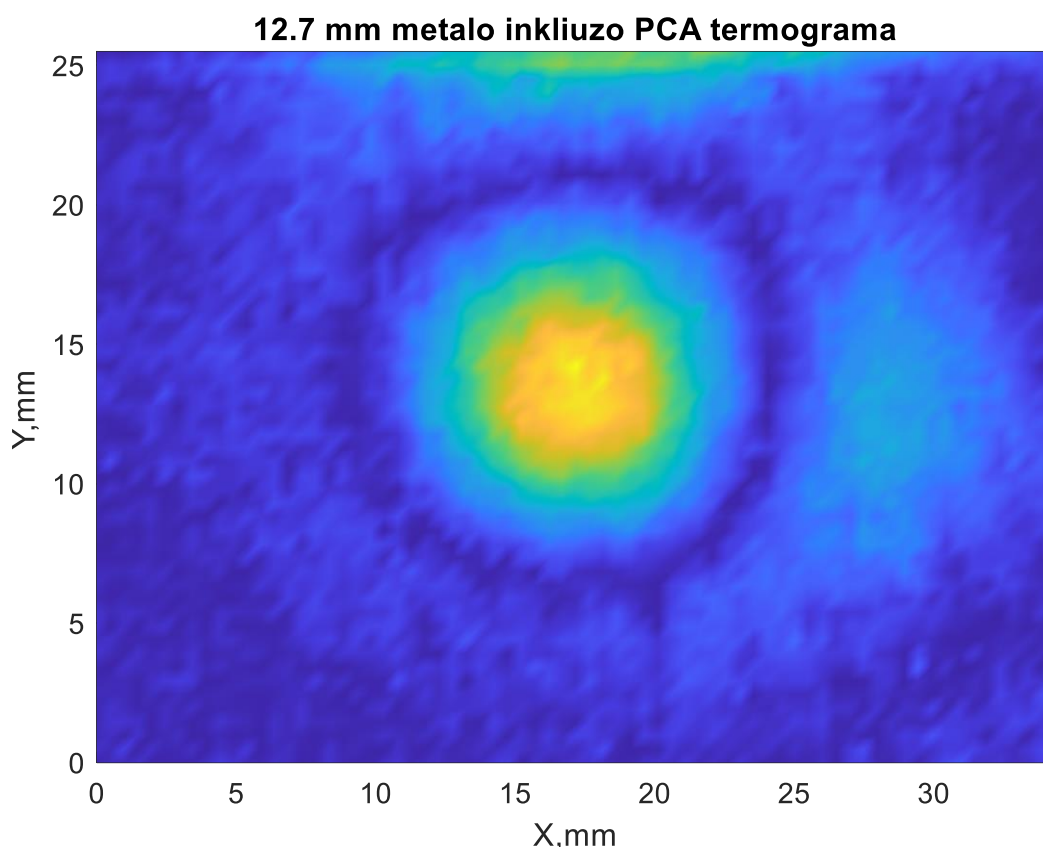
Indukcinės termografijos duomenys papildomai apdoroti remiantis principine komponentų analize (angl. *Principal component analysis – PCA*). PCA pritaikymas leidžia pašalinti netolygaus šilimo įtaką termogramoje ir padidinti defekto kontrastą vizualizacijoje. Tai yra atliekama skaičiuojant duomenų tikrinius vektorius ir rūšiuojant juos didėjimo tvarka, todėl pirmi komponentai neša daugiausiai informacijos. Užfiksuotos objekto paviršiaus temperatūrų vertės atskirtos šildymo ir aušimo etapais. Atskirtas temperatūrų profilis buvo registruojamas iki momento, kai temperatūrų skirtumas tarp užregistruotų kadru lygus 0. PCA apdoroti indukcinės termografijos duomenys toliau naudojami duomenų apjungimui.



21 pav. Sluoksnių atsiskyrimo, su įterptu 12,7 mm polimetilpenteno inkluzu, termograma, papildomai apdorota PCA technika

Implementavus principinės komponentų analizės techniką polimetilpenteno inkluzų turinčiam objektui ir apkarpius vaizdą iki sujungimo zonų, gautas rezultatas atvaizduotas 21 pav. Čia matoma, jog kontrastas tarp defekto zonos ir gero sluoksnių sukibimo tampa minimalus. Vaizde pašalinami netolygūs šilimo efektai, tačiau kaip ir originalioje TH vizualizacijoje, inkluzo zona vizualiai

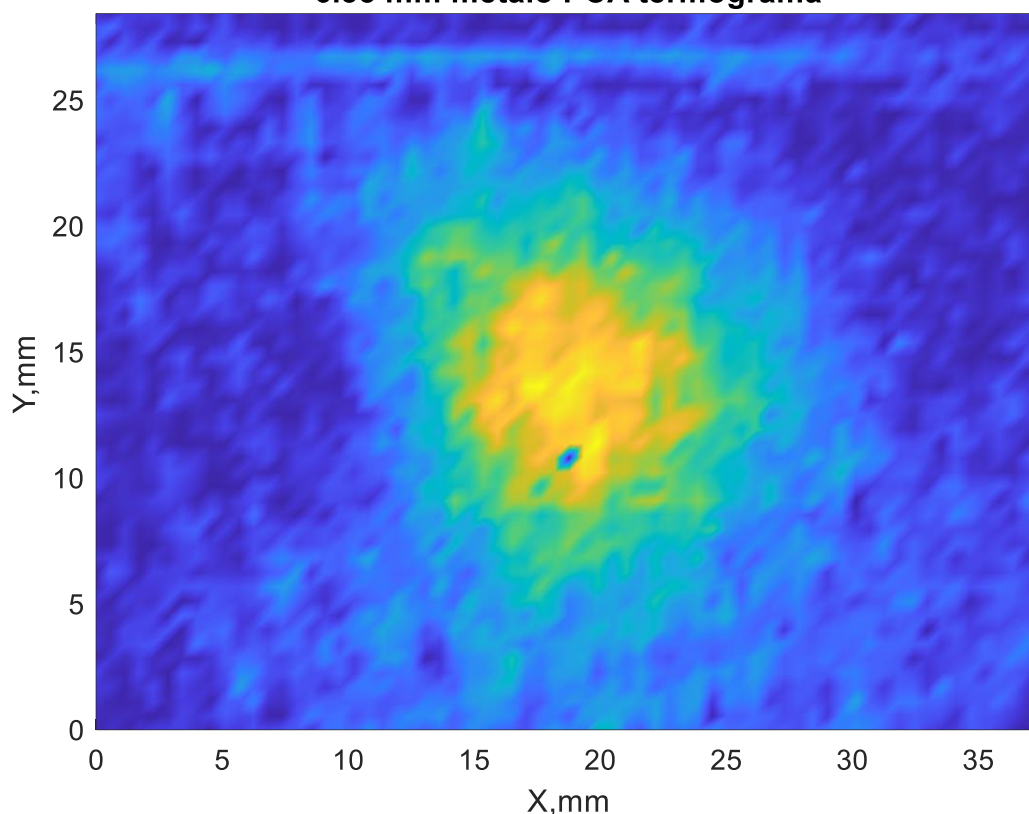
neišsiskiria. Vis dėlto PCA termogramos viršuje stebimas klijuoto sujungimo kraštas, kuris pasitarnauja kaip atributas realios defekto zonos estimavimui.



22 pav. Defekto, su įterptu 12,7 mm žalvario inkluzu, eksperimento termograma papildomai apdorota PCA technika

22 pav. matomas termografijos vaizdas po implementuotos PCA technikos 12,7 mm metalo bandiniui. Duomenų matricos X ir Y ašys transformuotos taip, kad vizualizacijoje pateiktas vaizdas Y ašies atžvilgiu būtų tarp klijuoto sujungimo viršutinės ir apatinės krašto zonos. 12,7 mm žalvario PCA vaizdas, lyginant su 12,7 mm polimetilpenteno PCA rezultatu, pasižymi ženkliai didesnėmis amplitudėmis defekto centre, be to, dėl netolygaus šilimo artefaktų sumažinimo išryškėja metalo inkluzo kontūras. Inkluzo zonos kontrastingumas leidžia palengvinti tolimesnius duomenų apdorojimo žingsnius ir tiksliau nustatytų realias defekto koordinatas. Visgi TH maksimumų zona yra ženkliai mažesnė negu pats defektas (12,7 mm). Tokiu atveju atkurtame vaizde žemesnių amplitudžių zonos neatspindi ten esančio defekto.

6.35 mm metalo PCA termograma



23 pav. Defekto, su įterptu 6,35 mm žalvario inkluzu, eksperimento termograma, papildomai apdorota PCA technika

Palyginus su 12,7 mm metalo defektu, mažesnis, 6,35 mm žalvario inkluzas PCA vaizde (23 pav.) pasižymi didesniu kontrastu. Taip pat, vizualiai maksimumo zonos yra artimesnės realaus defekto išmatavimams, o tai leidžia sumažinti defekto nustatymo klaidos tikimybę.

Oru perduodamo ultragarso matavimo duomenų matricos invertavimas

Idealiu atveju, termografijos vaizde, defekto vietoje registruojami maksimalios amplitudės taškai. Priešingas rezultatas gaunamas oru perduodamo ultragarso sąlygomis, kadangi naudojami UG keitikliai yra išsidėstę siūstuvo-imtuvo principu skirtingose klijuoto sujungimo bandinio pusėse. Čia bangų sklidimo kelyje pasitaikęs žalvario inkluzas ar polimetilpenteno plėvelė slopina ultragarso bangų energiją ir *C-scan* vaizde atitinkamose vietose stebimos amplitudžių minimumo zonos. Tam, kad įtraukti defektai būtų interpretuojami vienodai, kaip maksimumai, atliekamas apskaičiuotų ultragarso X ir Y kombinacijų amplitudžių invertavimas (24 pav. B, 25 pav. B):

$$UG_{INVERTED}(i,j) = 1 - UG(i,j), \quad (4)$$

kur $UG(i,j)$ yra duomenų formavimo metu apskaičiuota pikselio vertė 0 ir 1 diapazone.

Oru perduodamo ultragarso matavimo duomenų matricos vertimas pagal Y ašį

Dėl keitiklių išdėstymo skirtingose bandinio pusėse ultragarso matavime, suformuotas vaizdas yra apverstas išilgai Y ašies, lyginant su duomenimis iš infraraudonųjų spindulių kameros. Vaizdų suvienodinimui UG duomenų matrica per vertikale verčiama 180° (24 pav. C, 25 pav. C).

Linijinės interpoliacijos taikymas oru perduodamo ultragarso duomenų matricai

NDT ultragarso ir termografijos duomenų registravimui taikoma iš esmės skirtinga aparatūra ir principas, todėl nesutampa jų rezoliucija (žingsnis). Kadangi duomenų apjungimo procesas atliekamas pikselių lygyje, svarbu, kad abiejų duomenų kanalų matricų dydžiai sutaptų. Tačiau visų pirma, reikia suvienodinti abiejų matavimų vaizdus, kad kiekvienas apdorojamas taškas abiejuose NDT vaizduose reprezentuotų tą pačią zoną realiame tiriamajame objekte. Iš atliktų matavimų žinoma, jog ultragarso matavimo žingsnis lygus 1 mm, o indukcinės termografijos 0,4902 mm metalo inkluzų ir 0,5682 mm sluoksnių atsiklijavimo tyrimams. Tam tikslui atliekama linijinio interpoliavimo procedūra (24 pav. D, 25 pav. D), tarpinių ultragarso verčių aproksimavimui. Naujos UG duomenų matricos rėžiai, skaičiuojant X ir Y ašims atskirai, randami pagal formulę:

$$SIZE_{X/Y INTERP} = \frac{SIZE_{X/Y ORG} * n_{UG}}{n_{TH}}, \quad (5)$$

kur $SIZE_{XY ORG}$ – pradinis UG duomenų matricos X ar Y ašių dydis, n_{UG} – UG žingsnis, n_{TH} – termografijos žingsnis.

Rezultatas - X ir Y masyvai, kurie nurodo naujai formuojamos matricos dydį. Masyvų elementai yra n_{UG} žingsnio sumavimo rezultatas, kur paskutinis elementas yra $SIZE_{XY ORG}$ ašių ilgis.

Naujos interpoliuotos matricos verčių skaičiavimai atliekami žingsniuojant pro originalias $SIZE_{X ORG}$, $SIZE_{Y ORG}$ ašis žingsniu:

$$step = \frac{n_{TH}}{n_{UG}}. \quad (6)$$

Žingsniavimas pradedamas X ašimi iki paskutinio elemento j eilutėje, taip pereinant per visą matricą. Tada analogiškai, žingsniuojama Y ašimi iki paskutinio i stulpelio. Kiekvienoje pozicijoje skaičiuojama naujos matricos koordinatės vertė, įvertinant svorius:

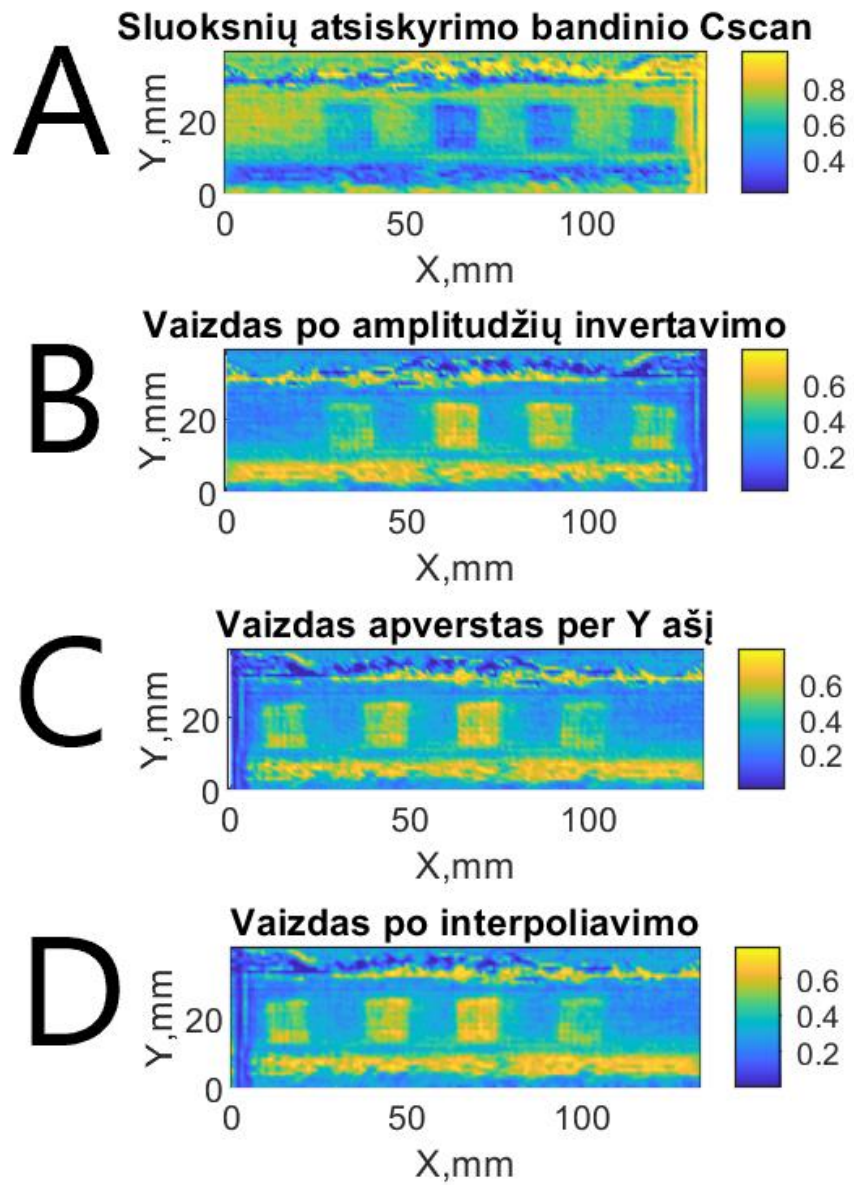
$$w_1 = step_n - i/j \quad (7)$$

$$w_2 = i/j + 1 - step_n, \text{ kai} \quad (8)$$

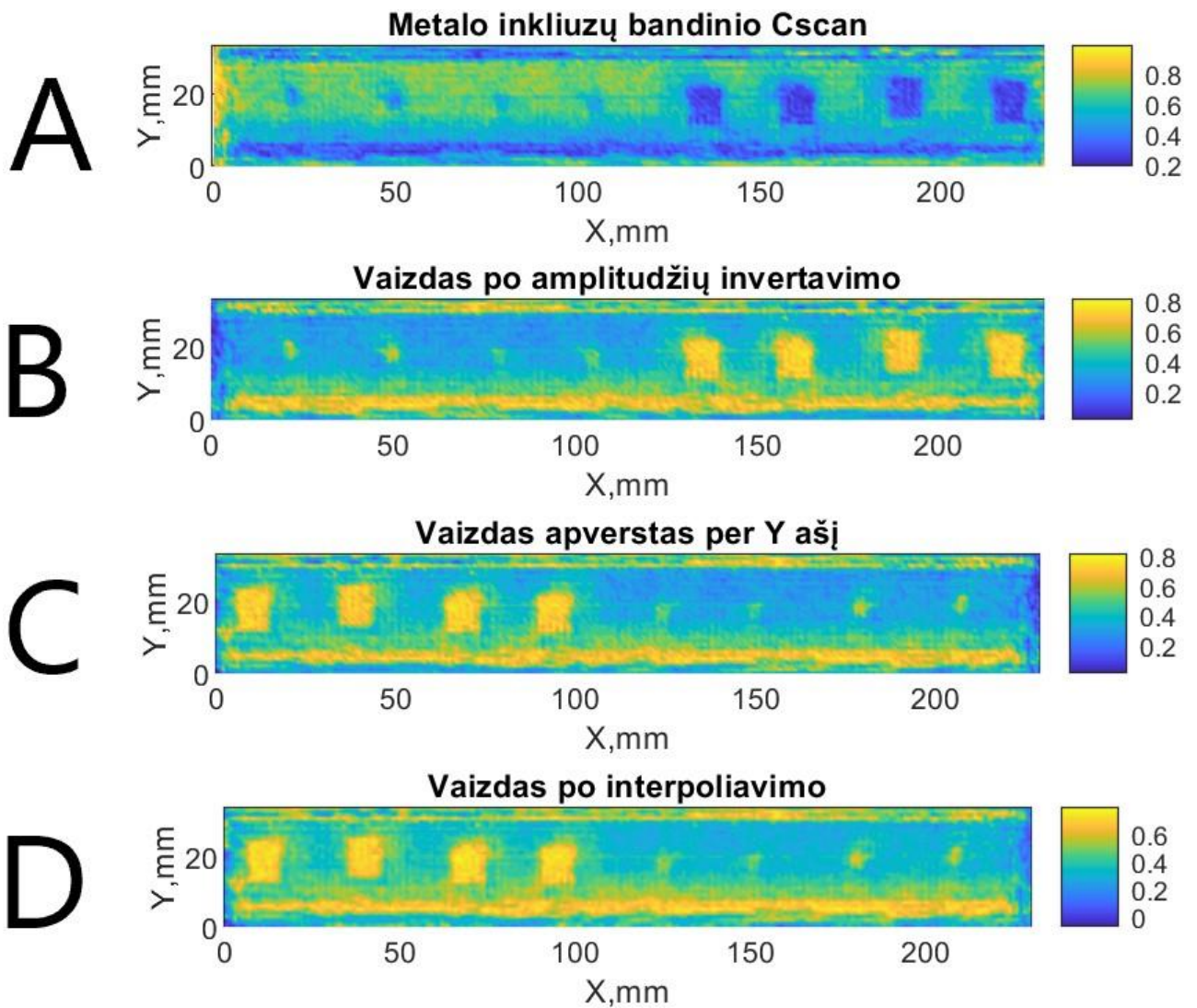
$$i/j \leq step_n \leq i/j + 1, \text{ tada:} \quad (9)$$

$$XY_{INTERP}(k, l) = w_1 XY_{ORG}(i, j) + w_2 XY_{ORG}(i + 1, j/i, j + 1), \quad (10)$$

kur w_1 ir w_2 yra daugiklių svoriai, $step_n$ – suminė pozicija indeksuojant $step$ dydžio žingsniu $XY_{INTERP}(k, l)$ – interpoliuotos matricos vertė koordinatės taške, $XY_{ORG}(i, j)$ – originalios UG matricos vertė koordinatėse.



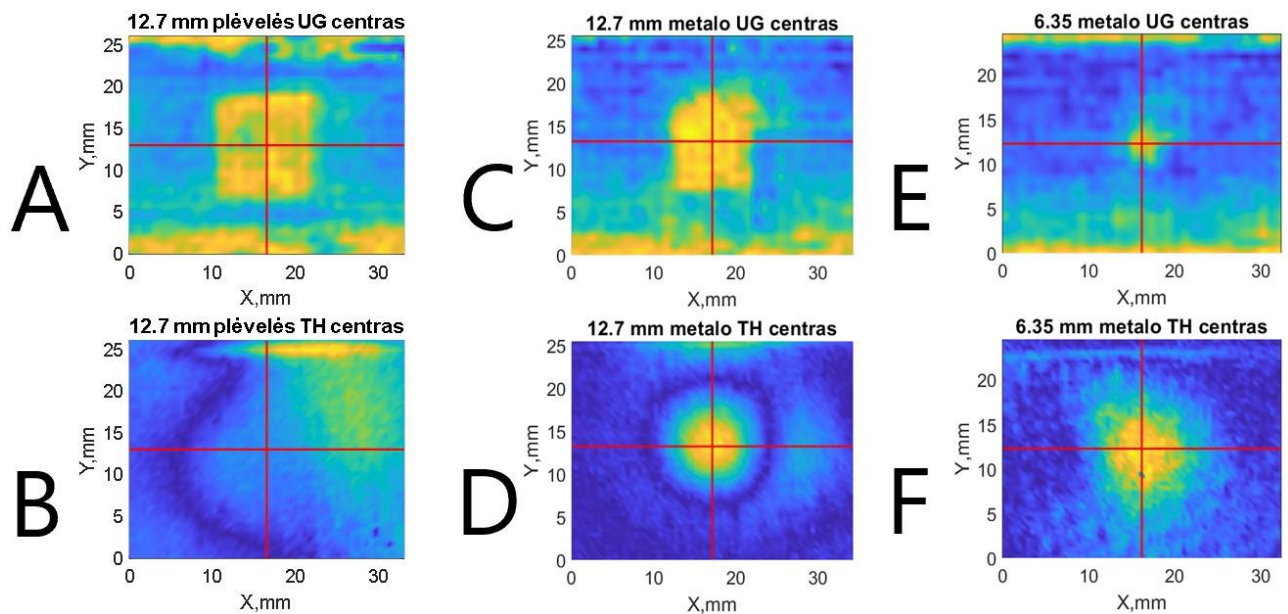
24 pav. 12,7 mm kraštinės polimetilpenteno plėvelės bandinio UG duomenų paruošimo žingsniai duomenų apjungimui



25 pav. Žalvario inkluzų bandinio UG duomenų paruošimo žingsniai duomenų apjungimui

Ultragarso ir termografijos vaizdų suderinimas – defektų centro pozicijų radimas

Kitame duomenų paruošimo žingsnyje seka atributų ir defekto atskaitos taškų išskyrimas. Pikselių lygyje randami abiejų matavimų vaizde kontrastingai matomi atributai – tiriamojo objekto krašto linija. Nepriklausomai nuo to, kuri klijuoto sujungimo krašto linija (viršutinė ar apatinė) yra aptinkama akimi lengviau, žinoma, jog atstumas tarp jų siekia 25 mm. Pagal šiuos duomenis randamas teorinis defekto centras Y ašyje, kurio atstumas 12,5 mm nuo krašto linijos (25/2 mm). X defekto centro koordinatės radimas sudėtingesnis dėl šoninių atributų nebuvimo. Visgi iš tiriamojo objekto inkluzų išdėstymo žinoma, jog atstumas tarp jų centrų turėtų siekti apie 25,45 mm. Iš suformuotų ultragarso ir indukcinės termografijos vaizdų, dėl vizualiai geresnio inkluzų kontrasto, subjektyviai parinkta apjungimo algoritmus taikyti 12,7 mm polimetilpenteno ir 12,7 mm metalo inkluzams esantiems antroje pozicijoje bandinio centro atžvilgiu. Tuo tarpu 6,35 mm metalo inkluzų bandinyje tiriamas trečias inkluzas nuo bandinio centro. Remiantis matmenų orientyrais ir defekto kontūrais, nustatytos inkluzų ir jų centro koordinatės. Matematinų operacijų mažinimui pagal krašto liniją ir izoliuojant parinktą defektą papildomai apkarpomi ultragarso ir termografijos matavimų C-scan vaizdai (žr. 26 pav.).



26 pav. Defekto centro pozicijų nustatymas: (A) polimetilpenteno plėvelės UG, (B) polimetilpenteno plėvelės TH, (C) 12,7 mm žalvarinio inkluzo UG, (D) 12,7 mm žalvarinio inkluzo TH, (E) 6,35 mm žalvarinio inkluzo UG, (F) 6,35 mm žalvarinio inkluzo TH

Amplitudžių normavimas

Galutinis duomenų paruošimo žingsnis – matavimų amplitudžių normavimas. Termografijos ir ultragarso duomenys perkeliama į verčių ruožą nuo 0 iki 1. Iš ultragarso ir termografijos duomenų matricių randamos maksimalios ir minimalios vertės. Kiekvienam matricos elementui taikomos skirtumo iš minimalios vertės ir dalybos iš maksimalios ir minimalios vertės skirtumo operacijos pagal formulę:

$$XY(i, j)_{01} = \frac{XY(i, j) - \min(XY)}{\max(XY) - \min(XY)}, \quad (11)$$

kur $XY(i, j)$ – matricos elementas, $\min(XY)$ – minimali matricos vertė, $\max(XY)$ – maksimali matricos vertė.

2.5. Duomenų apjungimo algoritmai

NDT matavimams taikomi standartiniai matematiniai ir sudėtingesni matriciniai ar statistiniai metodai, vertinant defektų poziciją pagal pirmąsčius rezultatus. Projekte bus tiriamos kelios skirtingos duomenų apjungimo technikos, vertinant, ar skirtingų matavimo šaltinių susiejimas leidžia pasiekti geresnį struktūrinių defektų aptikimą nei atskiri oru perduodamo ultragarso ir indukcinės termografijos matavimai.

Vienas paprasčiausių atliekamų duomenų apjungimo algoritmų – vidurkinimo. UG ir termografijos amplitudžių vidutinės pikselio reikšmės skaičiuojamos tame pačiame bandinio vaizdo taške. Tokiu būdu matoma vienoda abiejų matavimo šaltinių įtaka apjungtame vaizde. Dar viena analogiško sudėtingumo technika – skirtumo, atvirkštinės šaltinių koreliacijos vertinimui. Skaičiavimo metodas paremtas absoliutinių verčių skirtumo modulio radimu tarp abiejų šaltinių. Kiekvieno šaltinio įtakai vertinti taikomi svertinio vidurkio algoritmai. Proporcijoje taikomo duomenų kanalo svoris atsispindi formulėje (1UG-5TH ir 5UG-1TH). Įprastai svertinio vidurkio metodas taikomas, kai žinoma, jog vieno iš matavimų pasikliaujamumas yra didesnis, taip suteikiant jam didesnę daugiklį.

Pritaikytas Hadamarto matricos algoritmas, kuris paremtas algebrine pikselių daugybos operacija. Tarp dviejų šaltinių su vienodo dydžio duomenų matricomis atliekamas daugybos veiksmas. Gautas rezultatas – abiejų duomenų šaltinių produktas, kurio kiekvieno pikselio vertė yra multiplikuota toje pačioje faktinėje tiriamojo objekto lokacijoje.

Kitas algoritmas - Dempsterio-Šaferio (DS) kombinacija. DS teorija pagrįsta tuo, jog duomenys iš kiekvieno šaltinio gali lemti keletą įvykių. Šis algoritmas leidžia apskaičiuoti kiekvieno duomenų šaltinio reikšmingumą m hipotezės suformavimui. Atliktų ultragarso ir indukcinės termografijos matavimų atveju, galimos hipotezės yra trys – teigiama (defektas yra), neigiama (defekto nėra) ir abejonės (nežinoma, ar defektas yra, ar nėra). DS kombinacija ($m_1 \oplus m_2(A)$) realizuojama skaičiuojant hipotezių ortogonalų vidurkį iš skirtingų šaltinių (žr. 3 lentelę). Šaltinius ($m_1(B)$, $m_2(C)$) sudaro atliktų matavimo vaizdinių atributų matricos iš UG ir indukcinės termografijos eksperimentų. Dydis K nurodo prieštaravimo tarp dviejų šaltinių vertę. Jeigu rasta K vertė artima 1, duomenų apjungimas DS metodu lems labai žemą apjungimo efektyvumą.

Aprašytų duomenų apjungimo algoritmų matematinės išraiškos pateiktos 3 lentelėje.

3 lentelė. Duomenų apjungimo algoritmai su formulėmis ir aprašais

Apjungimo algoritmas	Aprašymas	Matematinė išraiška
Vidurkio	Ultragarso ir termografijos amplitudžių vidurkis	$\frac{A_U + A_T}{2}$,
Skirtumo	Ultragarso ir termografijos amplitudžių skirtumas	$ A_U - A_T $
Svertinio vidurkio	5:1 amplitudžių svorių vidurkinimas: 1UG-5TH ir 5UG-1TH	$\frac{A_U + 5A_T}{6}$ $\frac{5A_U + A_T}{6}$
Hadamarto matricos	Vienodo dydžio matricos pikselių daugyba	$(A_U \circ A_T)_{ij} = (A_U)_{ij} \circ (A_T)_{ij}$
Dempsterio-Šaferio kombinacijos	Įvykiais paremta teorija, kurioje vertinamas šaltinių reikšmingumas, rezultatų tikėtinumai	$m_1 \oplus m_2(A) =$ $\frac{1}{K-1} \sum_{B \cap C = A \neq \emptyset} m_1(B)m_2(C)$ kur $K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B)m_2(C)$

A_U – ultragarsinio signalo amplitudė; A_T – termografinio signalo amplitudė.

2.6. Duomenų apjungimo algoritmų efektyvumo vertinimas

Oru perduodamo ultragarso, indukcinės termografijos bei šių matavimų duomenų apjungimo rezultatai atvaizduoti sistemos veikimo charakteristikos kreive. Atskiri gauti vaizdai matematiškai lyginami su etaloniniu, kur aiškiai apibrėžtos realaus defekto pozicijos. Tokios pozicijos, kur defektas egzistuoja, prilyginamos 1, o likusios zonos – 0. Kiekvienas defekto zonos pikselis vaizde lyginamas su etaloniniu ir šie skirstomi į 4 kategorijas: teisingai teigiamas (TT) – kai teisingai nustatoma defekto pozicija, klaidingai teigiamas (KT) – neteisingai nustatoma defekto pozicija, teisingai neigiamas (TN) – teisingai nustatoma pozicija be defekto ir klaidingai neigiamas (KN) – neteisingai nustatoma pozicija be defekto.

Kiekvienai grupuojamai matricai apskaičiuojamas teisingai teigiamas atsikartojamumas (TTA) ir klaidingai teigiamas atsikartojamumas (KTA):

$$TTA = \frac{TT}{TT + KN} \quad (12)$$

$$KTA = \frac{KT}{KT + TN} \quad (13)$$

Šie TTA ir KTA parametrai atspindi ROC kreivės ašyse (TTA – Y ašyje, KTA – X ašyje).

Absoliutiniam duomenų apjungimo algoritmų vertinimui taip pat bus skaičiuojamos ploto po kreivės parametro vertės. AUC parametras rodo tiriamo duomenų apjungimo metodo tikimybę teisingai nustatyti teigiamą (defektuotą) ir neigiamą (taško, kur defekto nėra) atsitiktinai paimtą pikselio tašką duomenų matricoje:

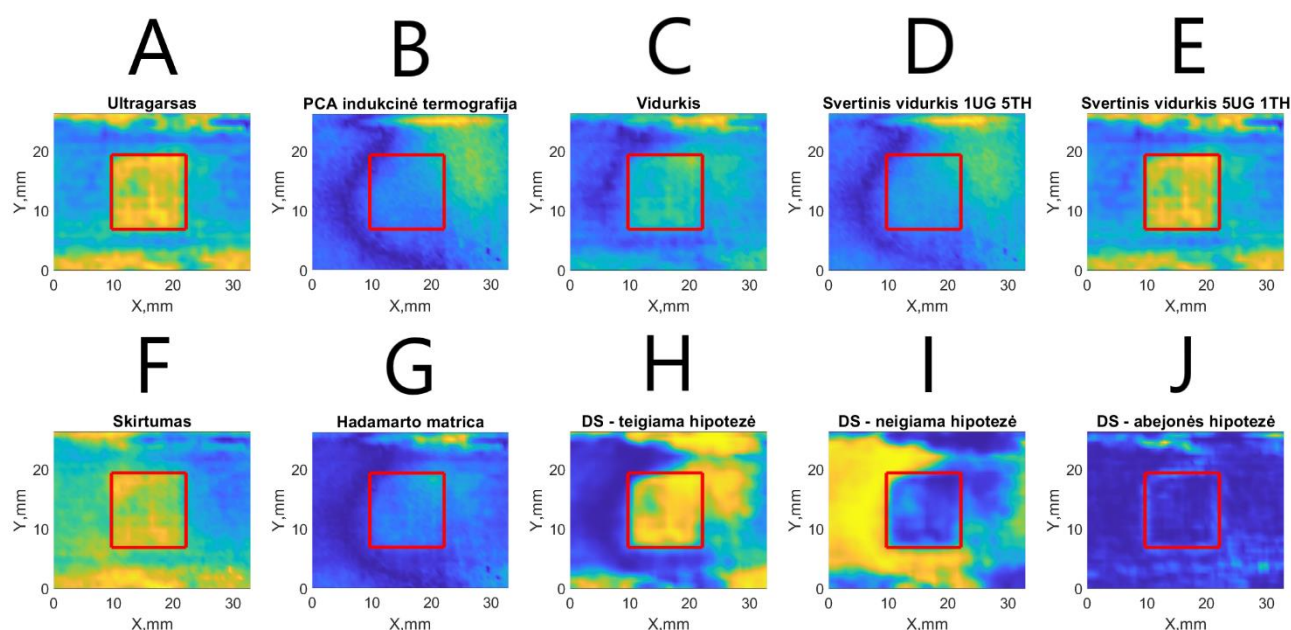
$$\int_{x=0}^1 TTA(KTA^{-1}(x)) dx. \quad (14)$$

3. Rezultatai

Bandiniai ištirti, remiantis metodinėje skiltyje aprašytais būdais. Pateikiami trys rezultatų variantai, atliekant bandymus su klijuotame sujungime įterptais 12,7 mm ir 6,35 mm vario inkluzais bei 12,7 mm polimetilpenteno plėvele, imituojančia medžiagos sluoksnių atsiskyrimą.

3.1. Tyrimo variantas nr. 1. Sluoksnių atsiskyrimas, įterpiant 12,7 mm kraštinės polimetilpenteno plėvelę

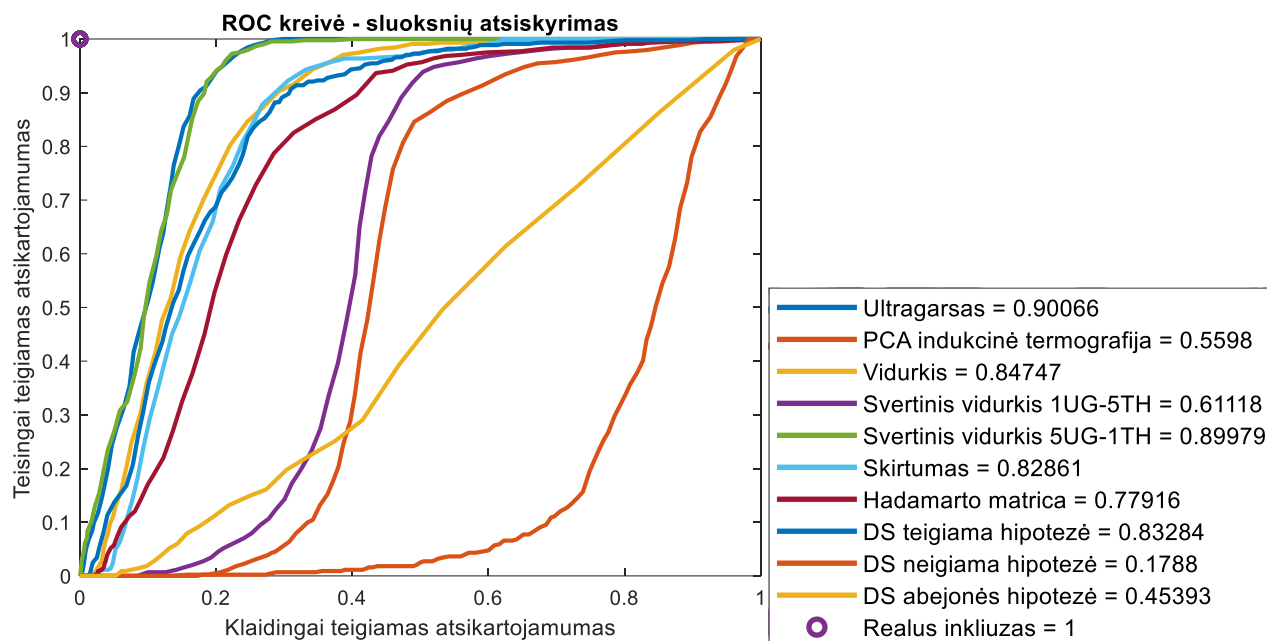
Sluoksnių atsiskyrimą imituojantis polimetilpenteno defektas klijuotame sujungime buvo ištirtas dviem NDT metodais – indukcinės termografijos ir oru perduodamu ultragarsu. Duomenų apjungimo algoritmai taikomi antram nuo vidurio defektui dėl vizualiai gero kontrasto pirminiuose vaizduose.



27 pav. Sluoksnių atsiskyrimo su įterptu 12,7 mm polimetilpenteno inkluzu duomenų apjungimo rezultatai. Realios inkluzų pozicijos pažymėtos raudonais kvadratais: (A) oru perduodamas ultragarsas, (B) indukcinė termografija po PCA apdorojimo, (C) UG ir TH vidurkis, (D) svertinis vidurkis, kai TH svoris 5 kartus didesnis už UG, (E) svertinis vidurkis, kai UG svoris 5 kartus didesnis už TH, (F) UG ir TH skirtumas, (G) Hadamarto matricos algoritmas, (H) DS defekto buvimo hipotezė, (I) DS defekto nebuvimo hipotezė, (J) DS, kai abejonė dėl defekto buvimo yra didelė

Lyginant termografinį (27 pav. B) ir ultragarsinį vaizdus (27 pav. A), matoma, jog UG matavimo rezultatas pasižymi kur kas aukštesne amplitude defekto zonoje, taip pat akivaizdžiai aptinkamas inkluzo kontūras, kas nepastebima TH vaizde. Vidurkio (27 pav. C) ir 1UG-5TH (27 pav. D) algoritmuose ženklus pagerėjimo, lyginant su TH, nėra. Kita vertus, 5UG-1TH (27 pav. E) ir skirtumo (27 pav. F) rezultate inkluzo zonos akimi aptinkamos, tačiau lyginant su UG vaizdu, kontrastas yra mažesnis, o amplitudės centrinėje dalyje – žemesnės vertės. Hadamarto matricos (27 pav. G) technika rodo prastus rezultatus defekto aptikimui. Dempsterio-Šaferio hipotezių algoritmai pasižymi dvejopu produktu, kur DS-teigiama (27 pav. H) hipotezė, lyginant su abejonės (27 pav. J) ir neigiama (27 pav. I) hipoteze, lokalizuoja inkluzą tiksliausiai.

Susisteminti duomenų apjungimo rezultatai sluoksnių atsiskyrimo bandiniui atvaizduoti sistemos veikimo charakteristikos kreivėje (žr. 28 pav.).

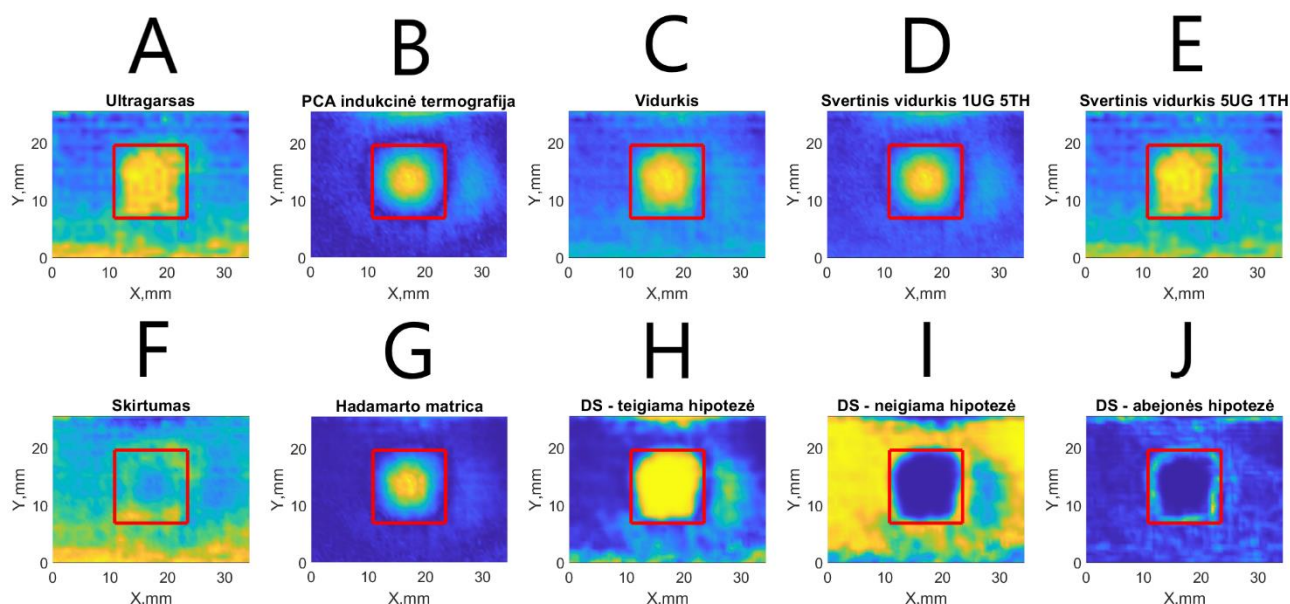


28 pav. Sistemos veikimo charakteristikos kreivės ir AUC skaičiavimų rezultatai. Sluoksnių atsiskyrimas, su įterptu 12,7 mm polimetilpenteno inkluzu

ROC kreivė atspindi teisingai ir klaidingai aptikto defekto priklausomybę. Paveikslo dešinėje pusėje esančios vertės yra TTD integralo pagal KTD ašį absoliutinės vertės, atspindinčios algoritmo efektyvumą. Realus defekto atveju matoma, jog ROC kreivėje taškas yra pozicijoje [0,1]. Idealiu atveju, kuo arčiau šios koordinatės vietos yra išsidėstę kreivės taškai, tuo patikimesnis apjungimo algoritmas. Iš ROC kreivės ir AUC skaičiavimų galima matyti, jog geriausias rezultatas pasiektas oru perduodamu ultragarsu (0,90066), kurį seka 5UG-1TH svertinio vidurkio (0,89979) duomenų apjungimas. Kadangi termografijos (0,5598) matavimo rezultatas ROC kreivėje atspindi prastus rezultatus, todėl 1UG-5TH (0,61118) metodo efektyvumas mažas dėl didelio svorio, tenkančio termografijos duomenims. Skirtumo (0,82861), Hadamarto matricos (0,77916), DS teigiamos hipotezės (0,83284) ir vidurkio (0,84747) algoritmų rezultatai rodo, jog šių metodų naudojimas polimetilpenteno inkluzų aptikimui gali suteikti reikšmingą tikimybę, tačiau nesiekia oru perduodamo ultragarso matavimo efektyvumo.

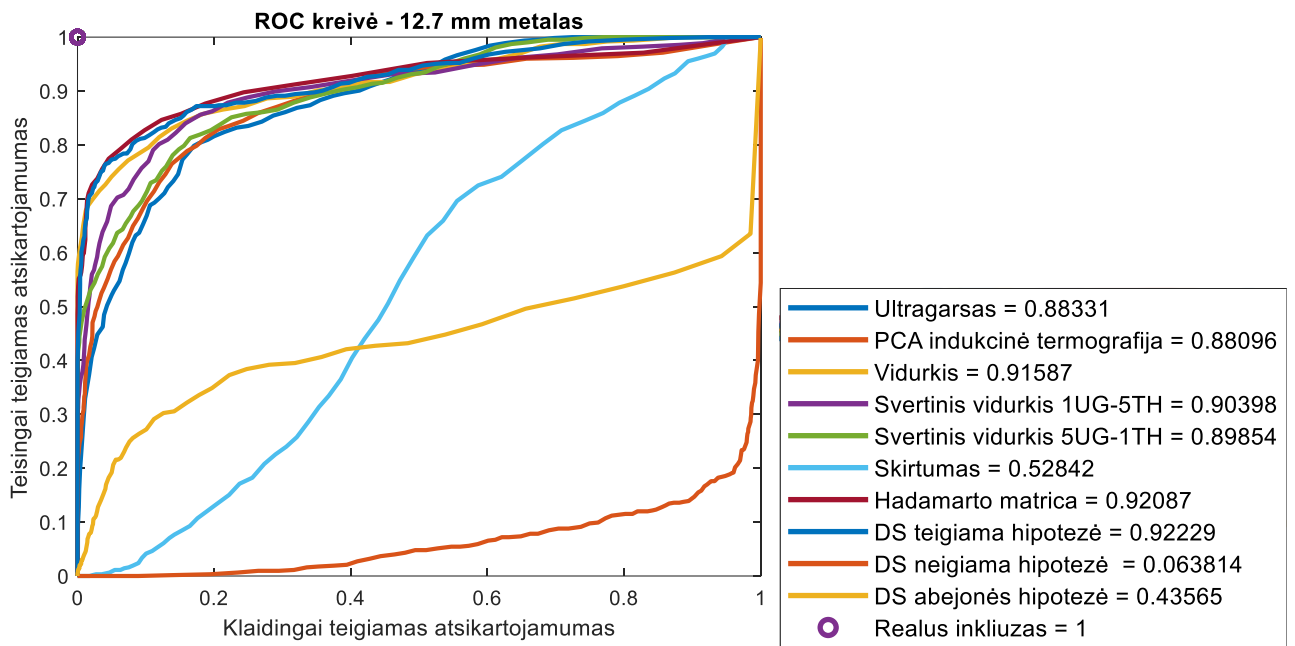
3.2. Tyrimo variantas nr. 2. Sluoksnių atsiskyrimas, įterpiant 12,7 mm kraštinės žalvario plokštelę

Bandinyje pasirinkta tirti antrąjį nuo vidurio 12,7 mm žalvarinį inkluzą. Užregistruoti duomenys apdoroti analogiškai 3.1 punktui. Duomenų apjungimo rezultatų vizualizacijos pateiktos 29 pav.



29 pav. Defekto su įterptu 12,7 mm žalvario inkluzu duomenų apjungimo rezultatai. Realios inkluzų pozicijos pažymėtos raudonais kvadratais: (A) oru perduodamas ultragarsas, (B) indukcinė termografija po PCA apdorojimo, (C) UG ir TH vidurkis, (D) svertinis vidurkis, kai TH svoris 5 kartus didesnis už UG, (E) svertinis vidurkis, kai UG svoris 5 kartus didesnis už TH, (F) UG ir TH skirtumas, (G) Hadamarto matricos algoritmas, (H) DS defekto buvimo hipotezė, (I) DS defekto nebuvimo hipotezė, (J) DS, kai abejonė dėl defekto buvimo yra didelė

Rezultatuose matoma, jog abu NDT matavimai (29 pav. A ir B) pasižymi geru efektyvumu aptinkant 12,7 mm metalo inkluzą klijuotame sujungime. Taip pat didelis defekto kontrastas pastebimas po vidurkio (29 pav. C) ir svertinio vidurkio duomenų apjungimo algoritmų pritaikymo (29 pav. D ir E). Šio bandinio atveju, duomenų šaltinių skirtumo algoritmas (29 pav. F) neefektyvus – kontūro linija susilieję su fonu. Tuo tarpu, vertinant Dempsterio-Šaferio duomenų apjungimo vaizdus, DS neigiamos (29 pav. I) ir teigiamos (29 pav. H) hipotezės rezultatai rodo ženklų defekto profilio išskyrimą medžiagoje. Visgi DS neigiamos hipotezės atveju, lyginant su kitais apjungimo rezultatais, amplitudės yra invertuotos ir objektyviai nustatyti metodo efektyvumo negalima.

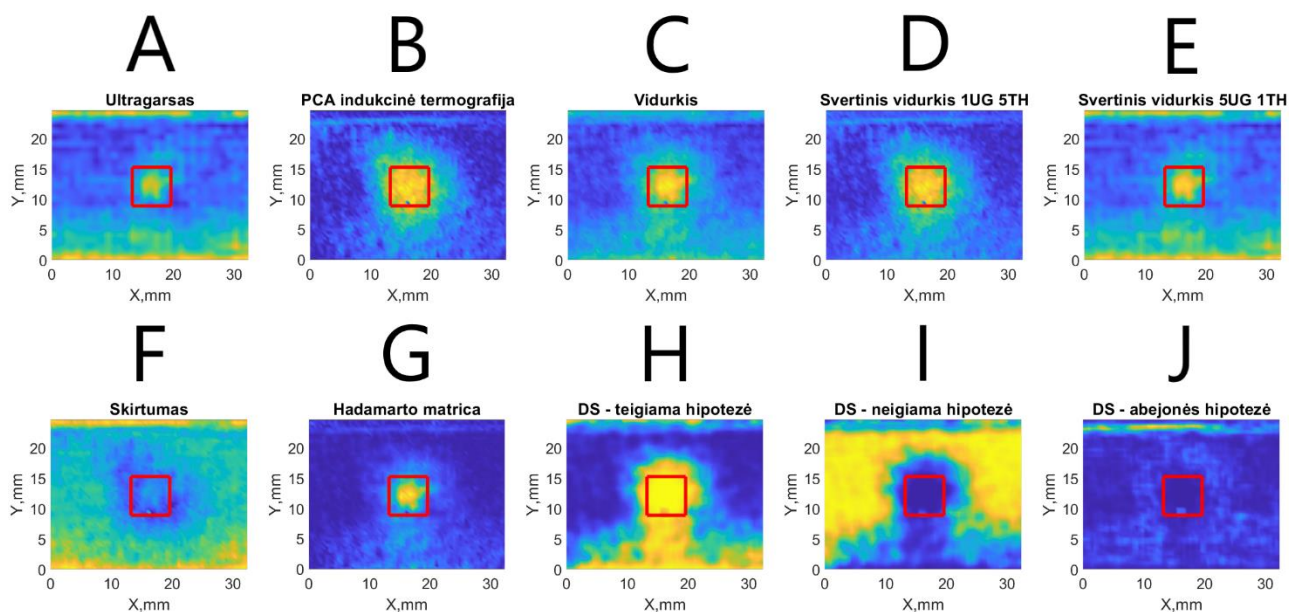


30 pav. Sistemos veikimo charakteristikos kreivės ir AUC skaičiavimų rezultatai. Defektas su įterptu 12,7 mm žalvario inkluzu

Remiantis objektyviais ROC kreivės duomenimis ir AUC skaičiavimais, UG ir PCA termografijos matavimų rezultatai yra panašaus efektyvumo (0,88331 ir 0,88096). Vidurkio (0,91587), Hadamarto matricos (0,92087), svertinių vidurkių 1UG-5TH (0,90398) bei 5UG-1TH (0,89854) algoritmai rodo geresnę 12,7 mm metalo aptikimo tikimybę nei NDT matavimai. Prasčiausi rezultatai stebimi skirtumo (0,52842), DS neigiamos (0,063814) ir DS abejonės (0,43565) hipotezės apjungimo technikomis. Tačiau manoma, jog DS neigiamos hipotezės duomenų apjungimo metodo rezultatas ROC kreivėse yra nulemtas skaičiavimų metu gautų invertuotų amplitudžių sąlygos. Tarp visų duomenų šaltinių apjungimo algoritmų geriausiu rezultatu pasižymi DS teigiamos hipotezės (0,92229) algoritmas.

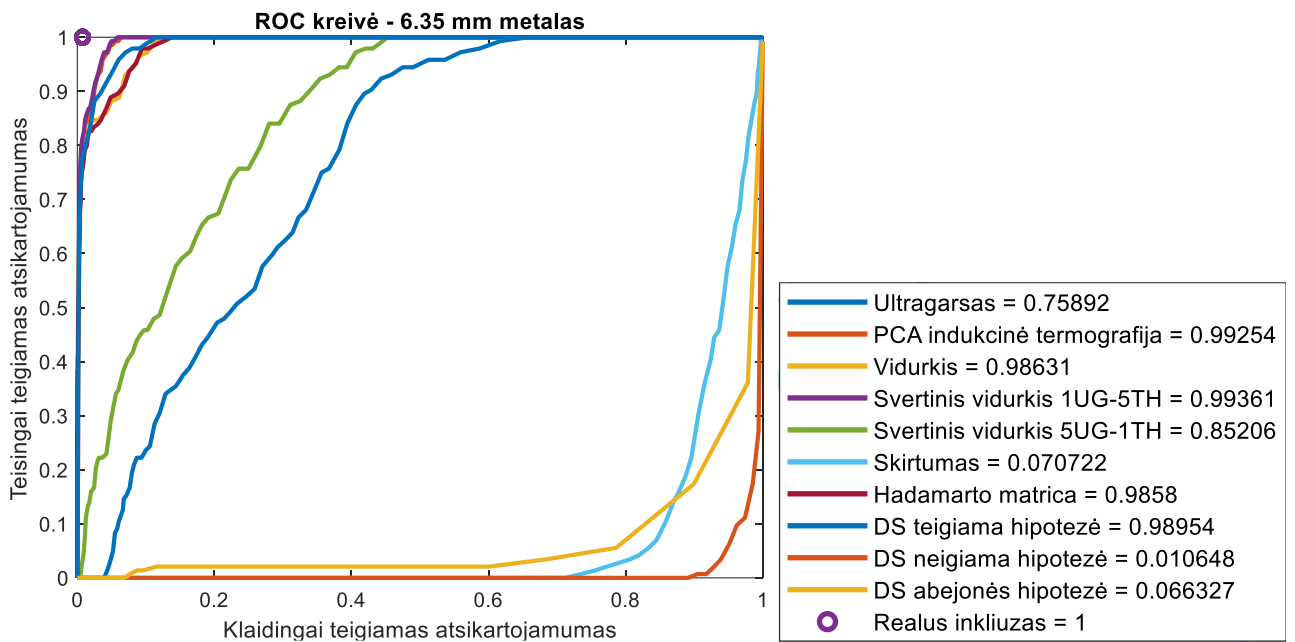
3.3. Tyrimo variantas nr. 3. Sluoksnių atsiskyrimas, įterpianč 6,35 mm kraštinės žalvario plokštelę

Bandinyje pasirinkta tirti trečią nuo vidurio 6,35 mm žalvarinį inkluzą. Užregistruoti duomenys apdoroti analogiškai 3.2 ir 3.1 punktui. Duomenų apjungimo rezultatai pateikti 31 pav.



31 pav. Defekto su įterptu 6,35 mm žalvario inkluzu duomenų apjungimo rezultatai. Realios inkluzų pozicijos pažymėtos raudonais kvadratais: (A) oru perduodamas ultragarsas, (B) indukcinė termografija po PCA apdorojimo, (C) UG ir TH vidurkis, (D) svertinis vidurkis, kai TH svoris 5 kartus didesnis už UG, (E) svertinis vidurkis, kai UG svoris 5 kartus didesnis už TH, (F) UG ir TH skirtumas, (G) Hadamarto matricos algoritmas, (H) DS defekto buvimo hipotezė, (I) DS defekto nebuvimo hipotezė, (J) DS, kai abejonė dėl defekto buvimo yra didelė

Rezultatų vizualizacijoje (31 pav. A) matoma, jog oru perduodamo ultragarso matavimo galimybės yra ribotos dėl įterptų mažesnių matmenų inkluzų. Amplitudės defekto centrinėse zonose nėra artimos 1. Tuo tarpu, indukcinės termografijos (31 pav. B) rezultatuose akivaizdžiai išsiskiria maksimumų zona, kurios vertės pasiskirsčiusios visame teoriniame įtrauktos struktūros plote. Dėl šios priežasties, geresnį svertinio vidurkio apjungimo rezultatą galima matyti 1UG-5TH (31 pav. D) metodu, dėl didesnės TH matavimo rezultatų įtakos skaičiavimui lyginant su 5UG-1TH (31 pav. E) apjungimo technika. Didelį kontrastą 6,35 mm žalvario bandinio tyrimui suteikia vidurkio (31 pav. C) ir Hadamarto matricos (31 pav. G) metodai. Tarp Dempsterio-Šaferio statistinių technikų, kaip ir ankstesniuose rezultatuose, geriausiu rezultatu pasižymi teigiamos hipotezės (31 pav. H) algoritmas. Nors defekto centre stebimos amplitudės lygios arba artimos 1, tačiau aukštesnių verčių zona sutelkta plačiame ruože – už teorinių inkluzo matmenų, kas turi įtakos padidėjusiai klaidingai teigiamo atsikartojamumo parametro vertei, bloginančiai duomenų apjungimo metodo efektyvumą.



32 pav. Sistemos veikimo charakteristikos kreivės ir AUC skaičiavimų rezultatai. Defektas su įterptu 6,35 mm žalvario inkluzu

Tiksliam duomenų apjungimo įvertinimui remiamasi sistemos veikimo charakteristikos kreivėmis ir absoliutiniais AUC skaičiavimų rezultatais. Mažesnio metalo defekto rezultatai, skirtingai nei 12,7 mm inkluzų atveju, rodo ženklų skirtumą tarp NDT matavimų, kur oru perduodamo ultragarso (0,75892) matavimo efektyvumas ženkliai prastesnis už indukcinės termografijos (0,99254). Dėl tokio skirtumo, natūralu, jog didesnis aptikimo tikslumas svertinio vidurkio skaičiavimuose yra 1UG-5TH (0,99361) metodu. Taip pat puikūs algoritmų efektyvumai stebimi vidurkio (0,98631), Hadamarto matricos (0,9858) ir DS teigiamos hipotezės (0,98954) technikomis. Mažiausios AUC vertės DS abejonės (0,066327) ir DS neigiamos (0,010648) hipotezės bei skirtumo duomenų apjungimo metodais.

Diskusija

Gauti duomenų apjungimo rezultatai, kuriuose naudojami du NDT matavimo rezultatų šaltiniai – oru perduodamo ultragarso ir indukcinės termografijos, rodo, jog implementuoti algoritmai gali padidinti defektų aptikimo efektyvumą. Tirti trys defektų variantai pasižymi skirtingais rezultatais, kur vienu atveju NDT matavimas yra efektyvesnis už taikytus apjungimo metodus, kitu pritaikyta technika ženkliai padidina inkluzo kontrastą klijuotame sujungime ir jo aptikimo tikimybę. Duomenų apjungimo rezultatų palyginimui tarp skirtingų tyrimo variantų sudarytas metodų efektyvumo eiliškumas, remiantis apskaičiuotomis AUC vertėmis (4 lent.)

4 lentelė. Bendras ir atskirų tyrimo variantų duomenų apjungimo algoritmų palyginimas

	12.7 mm polimetilpentenas	12.7 mm žalvaris	6.35 mm žalvaris	Bendras efektyvumas	Žalvariniai inkluzai
1	Ultragarso	DS teigiama hipotezė	1UG-5TH	DS teigiama hipotezė	DS teigiama hipotezė
2	5UG-1TH	Hadamarto matrica	PCA indukcinė termografija	Vidurkis	1UG-5TH
3	Vidurkis	Vidurkis	DS teigiama hipotezė	1UG-5TH	Hadamarto matrica / Vidurkis
4	DS teigiama hipotezė	1UG-5TH	Vidurkis	Hadamarto matrica / 5UG-1TH	
5	Skirtumas	5UG-1TH	Hadamarto matrica		PCA indukcinė termografija
6	Hadamarto matrica	Ultragarso	5UG-1TH	Ultragarso	5UG-1TH
7	1UG-5TH	PCA indukcinė termografija	Ultragarso	PCA indukcinė termografija	Ultragarso
8	PCA indukcinė termografija	Skirtumas	Skirtumas	Skirtumas	Skirtumas
9	DS abejonės hipotezė	DS abejonės hipotezė	DS abejonės hipotezė	DS abejonės hipotezė	DS abejonės hipotezė
10	DS neigiama hipotezė	DS neigiama hipotezė	DS neigiama hipotezė	DS neigiama hipotezė	DS neigiama hipotezė

Iš 4 lentelės duomenų matoma, jog efektyviausias duomenų apjungimo algoritmas tarp visų tyrimo variantų yra Dempsterio-Šaferio teigiamos hipotezės metodas. Toks pat rezultatas stebimas ir tiriant skirtingo dydžio metalo inkluzus. Prasčiausi rezultatai pasiekti taikant DS neigiamos ir abejonės hipotezės algoritmus bei šaltinių skirtumo techniką. Bendru atveju, pastebėta, jog duomenų apjungimo panaudojimas tikslesniam defektų aptikimui kūne, lemia geriausias rezultatus, kada NDT matavimų rezultatai neprieštarauja defekto buvimui pozicijoje, t. y., kai abiejų šaltinių matavimo AUC vertės yra artimos viena kitai.

Lyginant šiame projekte gautus rezultatus su analogišku tyrimu atliktu Yilmaz ir kt. [45], kur naudojami tokie patys klijuotų sujungimų bandiniai ir indukcinės termografijos matavimo metodika, tačiau kitokio pobūdžio, nardinamo keitiklio ultragarso eksperimentas, pastebima panaši tendencija tarp apjungimo metodų efektyvumo pasiskirstymo. 12,7 mm įterptos plėvelės defekto bandinyje tiksliausias defekto aptikimas pasiektas ultragarso matavimu, kurį seka 5UG-1TH svertinio vidurkio apjungimo technika. Didesnio žalvarinio inkluzo (12,7 mm) atveju, geriausias rezultatas gautas vidurkio ir DS teigiamos hipotezės algoritmais. Trečiame tyrimo variante (6,35 mm metalo inkluzas)

efektyviausi – DS teigiamos hipotezės ir IUT-5TH metodai. Blogiausia defektų nustatymo tikimybe, kaip ir šiame projekte, pasižymi DS neigiamos ir abejonės hipotezių bei šaltinių skirtumo duomenų apjungimo būdai.

Svarbu įvertinti, jog šiame projekte vienas iš NDT matavimų atliekamas oru perduodamo ultragarso būdu, kurio galimybės tarp kitų struktūrinės analizės būdų garso bangomis yra ribotos. Nardinamo keitiklio metodo substitucija oru perduodamu ultragarsu nulėmė nežymiai suprastėjusias ultragarso ir duomenų apjungimo algoritmų absoliutines AUC vertes. Tačiau ultragarsinis matavimas oru leidžia atlikti medžiagos struktūrinius tyrimus bekontakčiu būdu ir suteikia teigiamų perspektyvų NDT matavimams ateityje, kur svarbus kontakto nebuvimas tarp matavimo įrangos ir tiriamo objekto paviršiaus.

Išvados

1. Atlikus mokslinės literatūros analizę išskirti efektyviausi oru perduodamo ultragarso ir indukcinės termografijos matavimo metodai, vertinant tiriamojo objekto tipą ir galimų defektų pobūdžius. Nustatyti duomenų apjungimo implementavimui reikalingi žingsniai bei populiariausi algoritmai, leidžiantys padidinti defektų aptikimo tikimybę, lyginant su atskirais neardomaisiais matavimais.
2. Oru perduodamo ultragarso ir indukcinės termografijos matavimų rezultatams nustatyti žingsniai, kuriuos reikia atlikti prieš duomenų apjungimą. Bendrai abiem duomenų šaltiniams implementuoti triukšmų filtravimo veiksmai, matavimų vaizdų ir koordinacių suderinimas, atributų ir defektų centrų nustatymas koordinacių ašyse bei amplitudžių normavimas.
3. Paruoštos ultragarso ir termografijos duomenų matricos apdorotos standartinėmis matematinėmis operacijomis, kompleksiniais matriciniais ir statistiniais metodais. Apjungus duomenis taikant vidurkio, svertinio vidurkio, skirtumo, Hadamarto matricos ir Dempsterio-Šaferio algoritmus, nustatyta, jog šios technikos gali padidinti defekto kontrastą klijuotame sujungime.
4. Neardomųjų matavimų ir duomenų apjungimo rezultatai trims tyrimo variantams su įterptais 12,7 mm polimetilpenteno, 12,7 mm ir 6,35 mm žalvario inkluzais klijuotame sujungime objektyviai įvertinti sistemos veikimo charakteristikos kreivėmis ir ploto po kreivėmis skaičiavimų absoliutinėmis vertėmis:
 - 1) **12,7 mm delaminacijos (polimetilpenteno inkluzai).** Geriausias AUC rezultatas pasiektas oru perduodamo ultragarso matavimu (0,9).
 - 2) **12,7 mm žalvariniai inkluzai.** Geriausias AUC rezultatas pasiektas Dempsterio-Šaferio teigiamos hipotezės (0,92) algoritmu.
 - 3) **6,35 mm žalvariniai inkluzai.** Geriausias AUC rezultatas pasiektas svertinio vidurkio IUG-5TH (0,99) duomenų apjungimo algoritmu.

Apibendrinus skirtingų defektų tyrimų rezultatus nustatyta, jog norint pagerinti defektų aptikimo tikimybę, reiktų duomenis apjungti naudojant Dempsterio-Šaferio teigiamos hipotezės techniką. Duomenų sintezės algoritmų efektyvumas didėja, kai neardomųjų matavimų rezultatai rodo artimas defektų aptikimo bandinyje tikimybes.

Literatūros sąrašas

1. ESSIGA, W. - KREUTZBRUCK, M. Development of an inline monitoring system for quality assurance of thermoplastic CFRP tape using air-coupled ultrasound. In *AIP Conference Proceedings* . [s.l.]: American Institute of Physics Inc., 2019.
2. BARBOSA, N.G.C. et al. Comparison of different adhesively-bonded joint types for mechanical structures. In *Applied Adhesion Science* . 2018. Vol. 6, no. 1.
3. GAAL, M. et al. Focusing of ferroelectret air-coupled ultrasound transducers. In *AIP Conference Proceedings* . [s.l.]: American Institute of Physics Inc., 2016.
4. GROS, X.E. et al. Theory and Implementation of NDT Data Fusion. In *Research in Nondestructive Evaluation* . 1995. Vol. 6, no. 4, p. 227–236.
5. DWIVEDI, S.K. et al. Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review. In *Materials Today: Proceedings* [interaktyvus]. 2018. Vol. 5, no. 2, p. 3690–3698. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.620>>.
6. Non-Destructive Testing - J. B. Hull, Vernon John - Google Books. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-12-19]. Prieiga per internetą: <https://books.google.lt/books?hl=en&lr=&id=0k9dDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=non+destructive+material+testing&ots=2TCA1h7wEB&sig=8_MwW-PAP_le2yM9pZ8MtOIy9x8&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false>.
7. Practical Non-destructive Testing - Baldev Raj, T. Jayakumar, M. Thavasimuthu - Google Books. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-12-20]. Prieiga per internetą: <https://books.google.lt/books?hl=en&lr=&id=qXcCKsL2IMUC&oi=fnd&pg=PA1&dq=non+destructive+material+testing&ots=jNU8_4xa6E&sig=HGtU4o9Tj92xB7-UqILVbhualr0&redir_esc=y#v=onepage&q=non%20destructive%20material%20testing&f=false>.
8. Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing - J. Blitz - Google Books. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-12-20]. Prieiga per internetą: <https://books.google.lt/books?hl=en&lr=&id=r2APCQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR8&dq=non+destructive+material+testing&ots=UJ117A_sok&sig=L9sFn0zVe5DQJ_C_MkKm6ho8U_8&redir_esc=y#v=onepage&q=non%20destructive%20material%20testing&f=false>.
9. An Introduction to Ultrasonic Flaw Detection. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-03-22]. Prieiga per internetą: <<https://www.olympus-ims.com/en/applications-and-solutions/introductory-ultrasonics/introduction-flaw-detection/>>.
10. GOUGHERI, H.S. et al. A Comprehensive Study of Ultrasound Transducer Characteristics in Microscopic Ultrasound Neuromodulation. In *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems* . 2019. Vol. 13, no. 5, p. 835–847. [žiūrėta 2022-04-25].
11. Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing - J. Blitz, G. Simpson - Google Books. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-12-21]. Prieiga per internetą: <https://books.google.lt/books?hl=en&lr=&id=d3WWect9zQEC&oi=fnd&pg=PP13&dq=non+destructive+ultrasonic+defect&ots=YW79nZr_N4&sig=yocvJIVDVENE0NHQJ7YHYmt5VR4&redir_esc=y#v=onepage&q=non%20destructive%20ultrasonic%20defect&f=false>.
12. 2.3 Wave Propagation | Olympus IMS. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-03-22]. Prieiga per internetą: <<https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/flaw-detection/wave-propagation/>>.
13. LU, H. et al. The ultrasonic NDT technique utilizing the longitudinal or transverse waves induced by lamb wave in thin plates. In *Conference Proceedings - 10th Anniv., IMTC 1994: Advanced Technologies in I and M. 1994 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference* . [s.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1994. p. 1195–1197.

14. PRASAD, J. - NAIR, C.G.K. *ULTRASONICS* [interaktyvus]. . [s.l.]: McGraw-Hill Education, 2011. 211 p. ISBN 9780070707030.
15. KIM, M.G. et al. Impedance matching network for high frequency ultrasonic transducer for cellular applications. In *Ultrasonics* . 2016. Vol. 65, p. 258–267. .
16. HUANG, H. - PARAMO, D. Broadband electrical impedance matching for piezoelectric ultrasound transducers. In *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* . 2011. Vol. 58, no. 12, p. 2699–2707.
17. Ultrasonic Testing of Austenitic and Dissimilar Metal Welds: 4.7 In [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-12]. Prieiga per internetą: <<https://www.ndt.net/article/pow1297/schmid/schmid6.htm>>.
18. Nondestructive Evaluation Techniques : Ultrasound. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-12]. Prieiga per internetą: <<https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/EquipmentTrans/DataPres.xhtml>>.
19. CHEN, J. et al. Application of air-coupled ultrasonic nondestructive testing in the measurement of elastic modulus of materials. In *Applied Sciences (Switzerland)* . 2021. Vol. 11, no. 19.
20. GYEKENYESI, A.L. et al. Effect of experimental conditions on acousto-ultrasonic reproducibility</title>. In *Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aerospace Materials and Civil Infrastructures* . [s.l.]: SPIE, 2002. p. 177–186.
21. MARHENKE, T. et al. Modeling of delamination detection utilizing air-coupled ultrasound in wood-based composites. In *NDT and E International* . 2018. Vol. 99, p. 1–12.
22. SUNARSA, T.Y. et al. A reference-free and non-contact method for detecting and imaging damage in adhesive-bonded structures using air-coupled ultrasonic transducers. In *Materials* . 2017. Vol. 10, no. 12. [žiūrėta 2022-05-15].
23. WU, W.L. et al. Measurements of the weak bonding interfacial stiffness by using air-coupled ultrasound. In *AIP Advances* . 2017. Vol. 7, no. 12.
24. Air-Coupled Ultrasonic Testing - STARMANS. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-03-24]. Prieiga per internetą: <<http://www.starmans.net/applications/air-coupled-ultrasonic-testing/>>.
25. Air-coupled Ultrasound - A Millennial Review. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-03-24]. Prieiga per internetą: <<https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn507/idn507.htm>>.
26. PETERS, J. Non-Contact Inspection of Composites Using Air-Coupled Ultrasound. In . [s.l.]: AIP Publishing, 2003. p. 973–980.
27. GAN, T.H. et al. High-resolution, air-coupled ultrasonic imaging of thin materials. In *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* . 2003. Vol. 50, no. 11, p. 1516–1524.
28. YILMAZ, B. et al. Air-coupled, contact, and immersion ultrasonic non-destructive testing: Comparison for bonding quality evaluation. In *Applied Sciences (Switzerland)* . 2020. Vol. 10, no. 19, p. 1–22.
29. ŽUKAUSKAS, E. et al. Application of air-coupled ultrasonic technique for sizing of delamination type defect in multilayered materials. In .
30. FRANCO, L. et al. Induction thermography for automatic crack detection in automotive components. In . [s.l.]: QIRT Council, 2016.
31. SRAJBR C. et al. Induction-Excited Thermography — a Method to Visualize Defects in Semi-Structural Adhesive Bonds of Car Body Structures. In *Weld World 56* . 2012. p. 126–132.
32. BALAJI, L. et al. Induction thermography for non-destructive evaluation of adhesive bonds. In *AIP Conference Proceedings* . [s.l.]: American Institute of Physics Inc., 2013. p. 579–586.
33. PAN, M. et al. Defect characterisation using pulsed eddy current thermography under transmission mode and NDT applications. In *NDT and E International* . 2012. Vol. 52, p. 28–36.

34. CHENG, L. - TIAN, G.Y. Comparison of Nondestructive Testing Methods on Detection of Delaminations in Composites. In *Journal of Sensors* . 2012. Vol. 2012.
35. BA, A. et al. Development of multi-physics multi-scale modelling platform for CFRP composites using inductive thermography techniques. In *10th International Symposium on NDT in Aerospace* . 2018.
36. YILMAZ, B. et al. Comparison of different non-destructive testing techniques for bonding quality evaluation. In *2019 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, MetroAeroSpace 2019 - Proceedings* . [s.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. p. 92–97.
37. CUADRA, J. et al. Damage quantification in polymer composites using a hybrid NDT approach. In *Composites Science and Technology* . 2013. Vol. 83, p. 11–21.
38. LIU, Z. et al. Survey: State of the art in NDE data fusion techniques. In *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* . 2007. Vol. 56, no. 6, p. 2435–2451.
39. VÖLKER, C. - SHOKOUHI, P. Multi sensor data fusion approach for automatic honeycomb detection in concrete. In *NDT and E International* . 2015. Vol. 71, p. 54–60.
40. PLOIX, M.A. et al. NDE data fusion to improve the evaluation of concrete structures. In *NDT and E International* . 2011. Vol. 44, no. 5, p. 442–448.
41. CAO, Y. et al. Two-stream convolutional neural network for non-destructive subsurface defect detection via similarity comparison of lock-in thermography signals. In *NDT and E International* . 2020. Vol. 112.
42. VÖLKER, C. - SHOKOUHI, P. Clustering Based Multi Sensor Data Fusion for Honeycomb Detection in Concrete. In *Journal of Nondestructive Evaluation* . 2015. Vol. 34, no. 4, p. 1–10.
43. HEIDEKLANG, R. - SHOKOUHI, P. Application of Data Fusion in Nondestructive Testing (NDT). In *16th International Conference on Information Fusion* . 2013. p. 835–841.
44. COTIČ, P. et al. Image fusion for improved detection of near-surface defects in NDT-CE using unsupervised clustering methods. In *Journal of Nondestructive Evaluation* . 2014. Vol. 33, no. 3, p. 384–397.
45. YILMAZ, B. et al. Evaluation of bonding quality with advanced nondestructive testing (Ndt) and data fusion. In *Sensors (Switzerland)* . 2020. Vol. 20, no. 18, p. 1–17.