VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS FAKULTETAS
AVIACIJOS PRIETAISŲ KATEDRA

Miroslav Gruzdis

KOMPOZITINIŲ MEDŽIAGŲ DEFEKTŲ, APTINKAMŲ AKUSTINĖS NEARDOMOSIOS KONTROLĖS METODAIS, ATPAŽINIMO TYRIMAS

RESEARCH ON RECOGNITION OF COMPOSITE MATERIAL DEFECTS DETECTED BY ACOUSTIC NON-DESTRUCTIVE TEST METHODS

Baigiamasis magistro darbas

Aviacinės elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 62401T208
Elektronikos inžinerijos specializacija
Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2011

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Antano Gustaičio aviacijos institutas
Aviacijos prietaisų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. 1
Data 2011-05-10

Aviacinės elektronikos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Kompozitinių medžiagų defektų, aptinkamų akustinės neardomosios kontrolės metodais, atpažinimo tyrimas**

Autorius **Miroslav Gruzdis** Vadovas **prof. habil. dr. Eugenijus Pileckas**

Kalba

[X] lietuvių

[ ] užsienio

Anotacija

Baigiamajame darbe išnagrinėtos kompozitnės medžiagos jų charakteristikos ir ypatybės. Išnagrinėtas kompozitinių medžiagų panaudojimas aviacinių konstrukcijų gamybai.Išnagrinėti galimi defektai bei jų atsiradimo priežastis. Aptarti ultragarsinės neardomosios kontrolės principai, bei pritaikymas kompozitinių medžiagų ir konstrukcijų tyrimui. Išanalizuotos frontalinio echoskopinio vaizdo formavimo ypatybės ir jų pritaikymas medžiagos struktūrinei analizei. Išnagrinėti veiksniai įtakojantis ultragarsinio vaizdo sudarymo kokybę, bei sudaryta FVE struktūrinė schema. Sudarytas defekto atpažinimo algoritmas kurio realizavimas parodytas pasitelkiant Matlab programinį paketą. Pateikti pasiūlymai sistemos panaudojimui bei tolimesniam jos vystymui.

Prasminiai žodžiai: Kompozitinė medžiaga, ultragarsas, defektoskopija, frontalinio vaizdo echoskopas, kompozitinių medžiagų defektų atpažinimas.

Vilnius Gediminas Technical University
Antanas Gustaitis aviation institute
Department of **avionics**

ISBN ISSN
Copies No. 1
Date 2011-05-10

Aviation electronics study programme master thesis.

Title: **Research on Recognition of Composite Material Defects Detected by Acoustic Non-destructive Test Methods**

Author **Miroslav Gruzdis** Academic supervisor **prof. habil. dr. Eugenijus**

Thesis language

[X] Lithuanian

[ ] Foreign (English)

Annotation

In this work examined composite materials, their characteristics and features. Examined the use of composite materials to aircraft structures manufacturing. Examined the potential defects and their occurrence causes. Discuss ultrasonic non-destructive control principles and applications of composite materials and structures research. We analyzed the formation of frontal acoustic scenery features and adaptability for material structural analysis. Examine the factors influencing the quality of ultrasound imaging and created structural diagram of acoustic scenery formation. Created the defect detection algorithm and demonstrated through the realization of the Matlab software package. Proposals for the use of the system and its further development.

Keywords: Composite material, ultrasound, defectoscopy, frontal acoustic scenery, composite materials defects recognition

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACINIŲ PRIETAISŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas
_____
(Parašas)
_____
(Vardas, pavardė)
_____
(Data)

Miroslav Gruzdis

KOMPOZITINIŲ MEDŽIAGŲ DEFEKTŲ, APTINKAMŲ AKUSTINĖS DEFEKTOSKOPIJOS METODAIS, ATPAŽINIMO GALIMYBIŲ TYRIMAS

RESEARCH ON RECOGNITION OF COMPOSITE MATERIAL DEFECTS DETECTED BY ACOUSTIC NON-DESTRUCTIVE TEST METHODS

Baigiamasis magistro darbas

Aviacinės elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 62401T208
Elektronikos inžinerijos specializacija
Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas prof. habil. dr. Eugenijus Pileckas _____ _____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Konsultantas doc. dr. Zofija Babickienė _____ _____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2011

TURINYS

PAVEIKSLŲ IR LENTELŲ SĄRAŠAS 7
ĮVADAS 9
1. KOMPOZITINĖS MEDŽIAGOS JŲ CHARAKTERISTIKOS IR YPATYBĖS 11
1.1 Kompozitinių medžiagų taikymo aviacijoje pavyzdžiai 14
1.2 Aviacinių konstrukcijų, pagamintų naudojant kompozitines medžiagas, „darbo sąlygos“, galimi defektai, atsirandantys gamybos ir eksploatacijos metu (apibendrinta defektų klasifikacija) 17
1.3 Ultragarsinės neardomosios kontrolės bendri principai ir galimybės pritaikyti juos kompozitinių medžiagų ir konstrukcijų tyrimui 20
2. KOMPOZICINĖS MEDŽIAGOS STRUKTŪRINIŲ ECHOSKOPINIŲ VAIZDŲ FORMAVIMO GALIMYBĖS IR BŪDAI 28
2.1 Interferenciniai triukšmai ir spindulio fokusavimo įtaka 30
2.2 Skenavimo budo įtaka ultragarsiniam vaizdui 32
2.3 Frontalinio echoskopinio vaizdo formavimo ypatybės ir jo taikymo medžiagos struktūrinei analizei pagrindimas 33
2.4 Struktūrinio ultragarsinio vaizdo analizė, diagnostinių požymių paieška 35
2.5 Reikalavimų FVE skiriamajai gebai, ultragarso dažnių diapazonui, matavimų tikslumui ir informacijos apdorojimui bei atvaizdavimui suformulavimas 37
2.5.1 Ultragarsinių bangų sklidimo kompozitinėje medžiagoje charakteristikos 37
2.5.2 Ultragarso spindulių pluošto fokusavimas 38
2.5.3 Kompozitinės medžiagos struktūros vaizdo gavimas 39
2.5.4 Echoskopinių impulsų slopinimo nustatymo algoritmas 43
2.5.5 FVE reikalavimų formulavimas 46
3. FRONTALINIO VAIZDO ECHOSKOPO (FVE) KOMPOZITINĖSE MEDŽIAGOSE (DEFEKTOSKOPO) STRUKTŪRINĖ SCHEMA IR JOS ANALIZĖ 46
3.1 Defektų atpažinimo ir klasifikavimo algoritmų sukūrimas ir tyrimas 47
3.1.1 Vaizdo apdorojimo programos funkcinės schemos sudarymas 48
3.1.2 Programos panaudojimas defekto atpažinimui 48
REZULTATŲ APIBENDRINIMAS 51
LITERATŪRA 52
PRIEDAI 52

PAVEIKSLŲ IR LENTELŲ SĄRAŠAS

1 pav. Neorientuotas stiklo pluoštas ... 12
2 pav. Kryptingas gijų išdėstymas ... 13
3 pav. Stiklo pluošto suaudimo pavyzdžiai ... 13
4 pav. Aliuminio ir epoksidinių kompozitų su įvairiais pluoštais apkrovos/deformacijos kreivės ... 14
5 pav. Boeing 777 konstrukcijoje panaudos kompozitinės medžiagos ... 15
6 pav. Boeing 787 konstrukcijoje panaudoti kompozitai ... 16
7 pav. Lėktuvas Boeing 787 ... 16
8 pav. Atsisluoksniavimo (separacijos) pavyzdžiai ... 19
9 pav. Pluošto ir matricos separacija ... 19
10 pav. Branduolio pažeidimas korėto kompozito po vandens patekimo ... 19
11 pav. Neardomosios kontrolės metodų taikymo galimybės ... 21
12 pav. Akustinių kontrolės metodų klasifikavimas ... 22
13 pav. Pagrindiniai ultragarsinės neardančiosios kontrolės metodai ... 23
14 Pav. Signalo nuskaitymo principo pavyzdys ... 25
15 Pav. Atspindžio signalo pagavimas nuo vientiso daugiasluoksnio kompozito ... 25
16 pav. Atspindžio signalo pagavimas nuo kompozito su išsluoksniavimo defektų ... 26
17 pav. Ultragarso bangos reakcija į defektus ... 26
18pav. *C skanavimo būdu* vaizdo formavimo procesas ... 27
19 pav. Skenuojamas medžiaga ir A tipo skenavimo duomenų gavimas ... 28
20 pav. *B* būdo skenavimo duomenų vaizdavimas ... 28
21 pav. *C* būdo skenavimo vaizdo sudarymas ... 29
22 pav. Vaizdas sudarytas priimant atspindžius tik nuo bandinio pradinio paviršiaus ir per visa bandinį ... 29
23 pav. Ultragarsinio vaizdo su triukšmu gavimas ... 30
24 pav. Spindulių išsklaidymas ... 30
25 pav. Ultragarsinis vaizdas (deš.) gautas, skenuojant bandinį (kair.) nefokusuotu spinduliu ... 31
26 pav. Ultragarsinis vaizdas (deš.) gautas, skenuojant bandinį (kair.) sufokusuotu spinduliu ... 31
27 pav. Struktūros vaizdas ... 32
28 pav. Vaizdas gautas tiesiniu skenavimu ... 32
29 pav. Vaizdas gautas sektoriniu skenavimu ... 32
30 pav. Vaizdas gautas kombinuotu skenavimu ... 32
31 pav. Echoskopinio vaizdo formavimo schema ... 33
32 pav. Maksimalių skenavimo kampų ... 34

33 pav. Strob impulso vėlinimo priklausomybė priklausomybė nuo Frontalinio sektoriaus gylio .. 34
34 pav. Sklaidos charakteristikos duomenų gautų iš skirtingų keitiklių 35
35 pav. Tekstūriniai objekto požymiai 35
36 pav. Vaizdo duomenų atvaizdavimas histogramomis 36
37 pav. Statistinės surinktų duomenų charakteristikos..... 36
38 pav. Surinktu duomenų vaizdavimas spektrogramomis 36
39 pav. Krentančios bangos pasiskirstymas 37
40 pav. Ultragarso spindulio formavimo būdai 38
41 pav. Skenavimo signalo siuntimas ir rezultato gavimas linijinio skenavimo metu..... 40
42 pav. Fokusavimo gylio ir lauko gylio nustatymas..... 41
43 pav. Fokusavimo diapazono apribojimai..... 41
44 pav. Šoninė skiriamoji geba..... 42
45 pav. Ultragarsinio impulso sklidimo sluoksniuotoje medžiagoje spindulinė schema 43
46 pav. Defektoskopo struktūrinė schema..... 47
47 pav. Vaizdo apdorojimo programos funkcinė schema 48
48 pav. Nagrinėjami echoskopiniai vaizdai..... 48
49 pav. Kompozitinių struktūrų su defektu (deš.) ir be defekto (kair.) statistinės charakteristikos .. 49
50 pav. Priartintos charakteristikos vaizdas 49
51 pav. Kompozitinių struktūrų su defektu (deš.) ir be defekto (kair.) statistinės charakteristikos gaubtinės..... 50
1 lentelė Gamybos metų pasitaikantys defektai 17
2 lentelė Defektų atsiradimo priežastys ir tipai 17
3 lentelė. Dažniausiai pasitaikantis defektai orlaivio eksploatacijos metu..... 18
4 lentelė. Ultragarsinės bangos sklidimas kompozituose 37
5 lentelė. Vaizdo duomenų pasiskirstymo reikšmės..... 49

ĮVADAS

Pastaruoju metu galima aptikti vis daugiau gaminių, pagamintų iš kompozitinių medžiagų. Šios medžiagos gali būti pritaikytos labai įvairiuose srityse, galima sakyti, kad panaudojimo galimybės yra praktiškai neribotos. Kiekvienai sričiai galima pagaminti reikalingų charakteristikų gaminius, pritaikant skirtingas gamybos technologijas, kadangi kompozitinės medžiagos pasižymi tuo, kad yra tvirtos ir lengvos. Paprasčiausi kompozitai, kuriuos aptinkame kasdieniniame gyvenime tai gelžbetonis, klijuota fanera tai pat kompozitai aptinkami ir gamtoje tai sluoksniuoti akmenys netgi pats žmogus.

Sparti kompozitiniu medžiagų tobulinimas 2-ojo pasaulinio karo metų ir po jo buvo susijęs su lengvų ir patvarių medžiagų kuriomis pavyktu pakeisti plieną ir kitus metalus, aviacinėje, kosminėje ir automobilinėje pramonėje didėjančiu poreikiu [39]. Panaudojimas gali būti, pavyzdžiui buityje (vonias, kriaukles, vamzdžiai), sportinis inventorius (kartis šokinėjimui į aukštį, slidės, valtis, rogės), vandens transportas, automobiliu sportas, modeliavimas, automobiliu gražinimas, pramonė, statyba ir žinoma aviacijoje ir kosmonautikoje naudojami komponentai, pastarieji turi būti ypač aukštos kokybės. Norint užtikrinti kokybę ne tik gamybos, bet ir eksploatacijos metu, yra daroma gaminių akustinė neardomoji kontrolė. Kompozitinės medžiagos įvairiose srityse naudojamos, kadangi galima pagaminti gana paprastai vienetinius dalių modelius, gauti medžiagas, atsparias korozijai ir agresyvioms terpėms, termiškai stabilias, patvarias norima kryptimi ir tuo pačiu turinčias gera estetišką išvaizdą [30].

Kompozitinės medžiagos turi ir trūkumų, tai yra galimi defektų atsiradimai ne tik eksploatacijos metu, bet ir gamybos proceso metu, ir defektai nebūtinai yra iš karto pastebimi tiek dėl jų matmenų tiek dėl esamos vietos. Defektai medžiagoje gali kauptis ir grupuotis ir, laiku nepastebėjus, medžiaga gali suirti.

Vieni iš labiausiai paplitusių neardomosios kontrolės metodų yra ultragarsiniai metodai. Neardančioje kontrolėje naudojamos ultragarsinės vizualizacinės sistemos turi atvaizduoti aptiktus defektus, bei nustatyti jų vietą ir dydį. Skaičiavimo techniką panaudojus ultragarso technologijoje, prasiplėtė jos galimybės medicinoje ir neardančiojoje kontrolėje. Ypatingas dėmesys šiose srityse skiriamas tiems metodams, kurie leidžia gauti geresnės kokybės vaizdus arba tikslesnius matavimo rezultatus. Didinant bangų pluošto fokusavimą bei kryptingumą gaunama didesnė duomenų rezoliucija dėl to defekto ar struktūros pokyčių vietą galima nusakyti tiksliai ir ankstyvoje stadijoje. Sufokusuoti ilgą spindulį ir išlaikyti jo kryptingumą yra ganėtinai sudėtinga, bet aviacijoje naudojamų medžiagų storis nėra didelis, o defektų užuomazgos prasideda prie pat paviršiaus dėl to sufokusuotas spindulys gali būti vos keleto milimetrų ilgio. Gaunamo vaizdo kokybė tai pat

priklauso ir nuo skenavimo būdo bei tipo pasirinkimo, tai paskui gali turėti įtakos toliau analizuojant duomenis ir turėti tiesioginio poveikio surandant kompozitinės medžiagos struktūros pažeidimų.

Apie šias ir kitas ultragarsinio vaizdo formavimui darančių veiksnių įtaką, defektų atpažinimo galimybes, vaizdo sudarymo būdus bei spindulių pluošto fokusavimą bus nagrinėjama šiame darbe. Šiame darbe aptarsime kompozitines medžiagas jų charakteristikas bei ypatybes, šių medžiagų taikymo aviacijoje pavyzdžius ir aviacinių konstrukcijų pagamintų naudojant kompozitines medžiagas darbo sąlygas ir galimus defektus. Tai pat trumpai apžvelgsime ultragarsinės neardomosios kontrolės bendrus principus ir galimybes pritaikyti juos kompozitinių medžiagų ir konstrukcijų tyrimui. Sudarysime ir išnagrinėsime defektų atpažinimo algoritmą, bei jo pritaikymo frontalinio echoskopinio vaizdo analizei.

1. KOMPOZITINĖS MEDŽIAGOS JŲ CHARAKTERISTIKOS IR YPATYBĖS

Kompozitinė medžiaga – tai nevienalytė kieta medžiaga, susidedanti iš dviejų ar daugiau komponentų, iš kurių galima išskirti armuojančius elementus (pluoštas, skaidulos) užtikrinančius būtinas gaminio mechanines charakteristikas, ir matricos (užpildas), kuri užtikrina suderintą armuojančių elementų veikimą. Mechaninis kompozito elgesys sąlygojamas armuojančių elementų ir matricos savybių santykiu ir ryšio tarp jų patvarumu. Medžiagos efektyvumas ir veiksmingumas priklauso nuo pradinių komponentų ir jų tarpusavyje suderinimo technologijos kuri užtikrintų tvirtą ryšį tarp komponentų išsaugant pirmines komponentų savybes. Matricos ir armuojančių elementų tarpusavio suderinimas, sudaro savybių kompleksą kuris ne tik atkartoja sudedamųjų komponentų pirmines savybes, bet ir įgauna savybių, kurių sudedamieji elementai atskirai neturi. Sąsajos tarp armuojančių elementų ir matricos buvimas padidina medžiagos atsparumą įtrūkimams skirtingai nei vienalytes medžiagos, tokios kaip metalas. Statinio tvirtumo padidinimas lemia irimo charakteristikų gerėjimą. Dauguma kompozitų turi anizotropines įvairių fizikinių reiškinių savybių, tai nebūtinai turi būti mechaninės savybės, pvz., polaroid tai kompozito pavyzdys, kuris pasiekė komercinį pasisiekimą dėl išskirtinių elektrooptinių anizotropinių savybių.

Dažniausiai kaip armuojančiam elementui naudojami stiprūs audiniai, tokie kaip stiklo pluoštas, asbesto pluoštas, kevlaras (aramidas) arba anglies pluoštas, kurie suteikia medžiagai didelį atsparumą tempiant. Dažniausiai naudojami užpildai – tai sintetinė derva, kurios pagrindas yra poliesteras (poliefiras) arba polieteras (epoksidas), poliuretanas ir silikoninė derva. Šiuolaikinių kompozitinių medžiagų tobulėjimas prasidėjo po sintetinės dervos gamybos įvaldymo, sudarančių pagrindą laminatų produkcijoje. Vienu iš pirmųjų šios dervos pagrindu buvo bakelitas, pirmasis iš fenoplastų [39]. Kompozitinės medžiagos gali būti daugiakomponentės – polimatricinės, kai vienoje medžiagoje suderinama keletas matricų, arba hibridinės, į kurių sudėtį įeina įvairios armuojančios medžiagos. Pagal struktūrą kompozitines medžiagas galima suskirstyti į keletą pagrindinių klasių: pluoštiniai, sluoksniuoti, sutvirtinti dispersiškai. Kompozitinės medžiagos, kaip jau anksčiau minėta, gali turėti įvairią struktūrą, taigi apžvelgsime dažniausiai aptinkamus kompozitus:

Stiklo plastikas – polimerinė kompozitinė medžiaga, armuota stiklo pluoštu kuris yra suformuotas iš neorganinio lydyto stiklo. Dažniausiai naudojamos matricos yra iš termiškai reaktyvių sintetinių dervų (fenolinės, epoksidinės, poliefirinės) ir termoplastinių polimerų (poliamidai, polietilenas, polistirolas). Šios medžiagos pasižymi pakankamai didelių patvarumu, didelė šiluminė varža, aukštos elektroizoliacinės savybės ir yra skaidrios radijo bangoms. Stiklo plastiko 80 % masės sudaro pluoštas, sluoksniuota medžiaga, kur naudojamas audinys iš stiklo

pluošto, vadinama stiklotekstolitu. Stiklo plastikas yra pakankamai pigi medžiaga, dėl to ji yra naudojama buitinių daiktų, sportinio inventoriaus, langų rėmų gamyboje.

Anglies plastikas – čia armuojanti medžiaga yra anglies pluoštas, gaunamas iš sintetinių ir gamtinių pluoštų celiuliozės pagrindu. Anglies plastikui naudojamos tos pačios matricos kaip ir stiklo plastikui dažniausiai termoaktyvūs ir termoplastiški polimerai. Pagrindinis anglies plastikų privalumas lyginant su stiklo plastikais yra jų mažas tankis ir didelis standumo modulis. Anglies plastikas turi praktiškai nulinį linijinio plėtimosi koeficientą, jie yra labai lengvi ir tuo pat metu labai patvarūs. Anglies plastikas naudojamas aviacijoje, raketų gamyboje, automobilinės technikos, medicininės technikos, medicininės technikos bei sportinio inventoriaus. Anglies pluošto ir anglies matricos pagrindu yra sudaromos anglies grafito kompozitinės medžiagos (anglies plastikai), sugebančios inertinėse ir atsikuriančiose aplinkose ilgai išlaikyti iki 3000 ^{0}C temperatūras. Tokios medžiagos naudojamos aukštos temperatūros veikiamu mazgų raketų technikoje, elektroterminės įrangos gamyboje, bei stabdžių kaladėlės lėktuvams ir daugkartinio naudojimo kosminiams laivams.

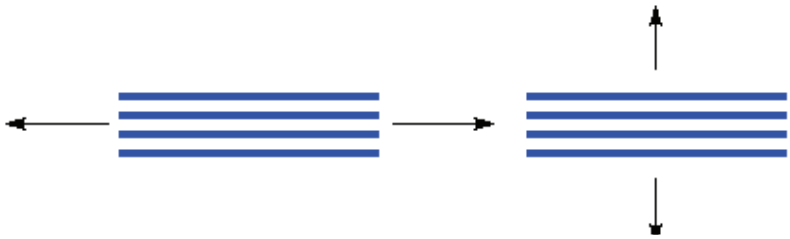
Boro plastikas – kompozitas kurio armuojantys elementai yra boro pluoštas, ir naudojama termoreaktyvinė polimerinė matrica. Pluoštas gali būti monosiūlių arba audinio juostų kur boro siūlės perpintos kitomis siūlėmis. Dėl labai kietų siūlių gaunama medžiaga pasižyminti aukštomis mechaninėmis savybėmis (boro pluoštas turi didžiausią atsparumą spaudimui lyginant su kitomis medžiagomis) ir labai didelį atsparumą agresyvioms sąlygoms, bet tuo pačiu medžiaga yra trapi dėl ko sudėtingėja jos apdirbimas ir yra ribota gaminių forma. Terminės kompozito savybes sąlygojamos matricos terminių atsparumų, dėl to darbinės temperatūros nėra labai aukštos. Dėl dideles boro plastiko kainos jis naudojamas išskirtinai tik aviacinėje ir kosminėje technikoje, detalėms, kurias veikia ilgalaikės apkrovos agresyvioje aplinkoje [13].

Ganėtinai paplitęs yra stiklo pluoštas. Užpilant pluoštą derva, kuri suklijuoja pluoštą ir sukietėjus gaunamas stiklo plastikas, sustiprintas stiklo pluoštu. Pluošto išsidėstymas viduje nusako kokias savybes turės medžiaga. Galimi keli išdėstymo variantai, tai yra tiesiog supainiota masė (1pav.).



1 pav. Neorientuotas stiklo pluoštas [29]

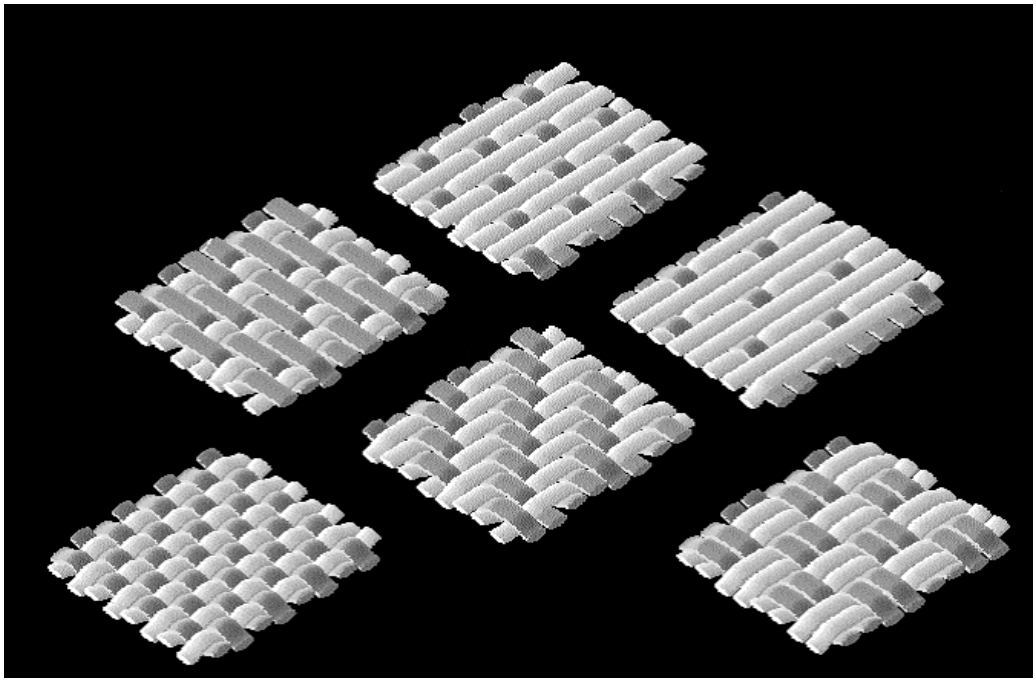
Toks neorientuotas stiklo pluoštas sudaro pakankamai stiprią medžiagą su praktiškai vienodomis mechaninėmis medžiagos savybėmis visomis kryptimis, bet jos nėra pačios geriausios. Norint gauti labiau patvarų gaminį galime nukreipę stiklo pluošto gijas viena kryptimi (2 pav.). Tokiu atveju pluoštas kompozitui suteikia gana neįprastas savybes, medžiagą tempiant gijų išsidėstymo kryptimi turime labai patvarų, bet jei tempsime statmenai gijoms jis bus visiškai nepatvarus.



a) Tempimas gijų kryptimi b) Tempimas statmenai gijoms

2 pav. Kryptingas gijų išdėstymas [29]

Kaip matome, tai nėra visiškai geras sprendimas, bet tai nėra trūkumas, kadangi yra atvejų, kai mums reikalingas kompozitas patvarus tik viena kryptimi. Bet kartais mums reikia gauti medžiagą patvaria visomis kryptimis, tokiu atveju naudojamas audinys, padarytas iš stiklo pluošto, kuris kompozitą padaro vienodai patvarų visomis kryptimis. Audinys irgi gali būti suaustas įvairiai, audinio pavyzdžiai pateikti (3 pav.).

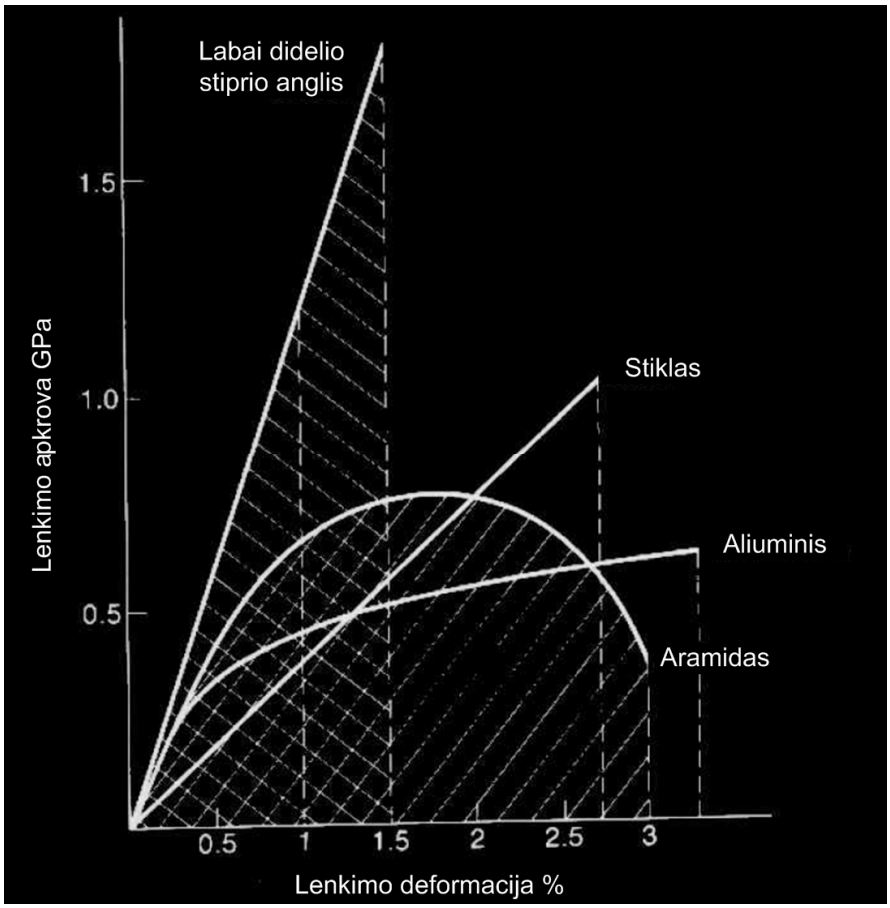


3 pav. Stiklo pluošto suaudimo pavyzdžiai [33]

1.1 Kompozitinių medžiagų taikymo aviacijoje pavyzdžiai

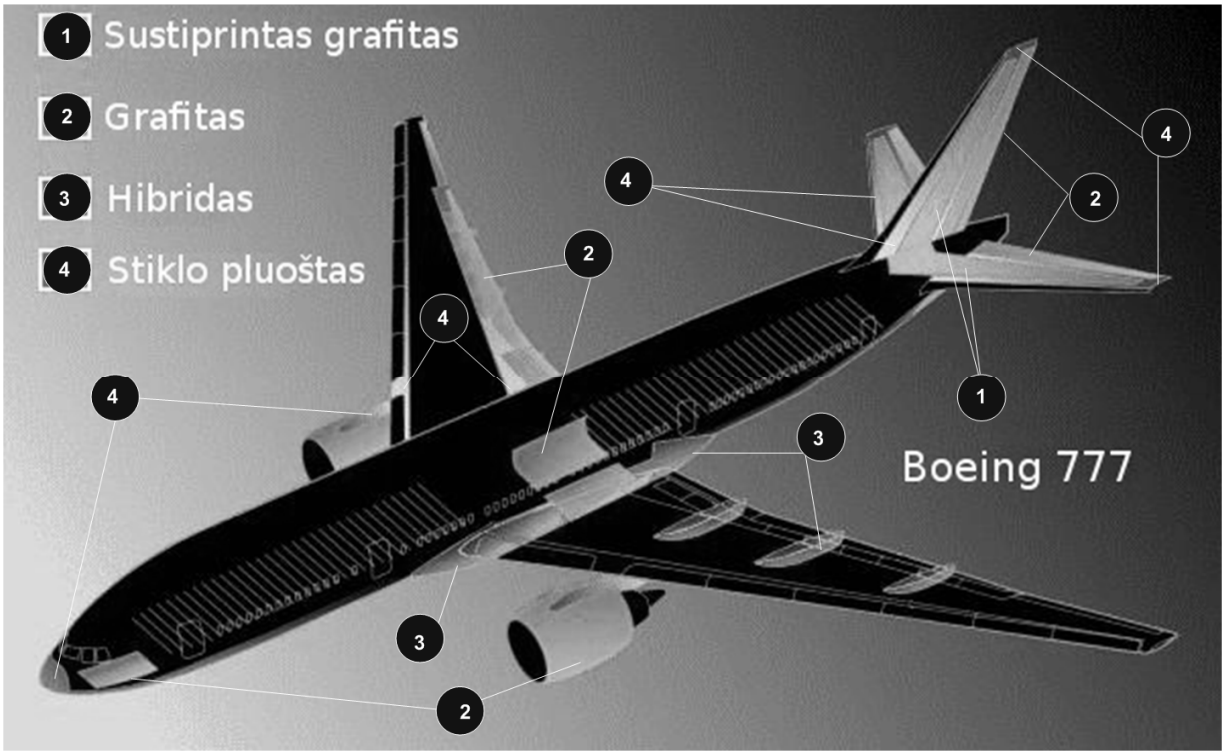
Kompozitinės medžiagos aviacijos srityje plito ganėtinai lėtai, bet diegiant naujas technologijas, pradėta vis daugiau naudoti komponentų, pagamintų iš kompozitinių medžiagų, kaip jau ankščiau buvo paminėta, naudojimo sritis yra ganėtinai plati ir, priklausomai nuo aplinkos ir mechaninių parametrų reikalavimų, gaminami įvairios sudėties kompozitai. Kompozitinių medžiagų panaudojimas aviacijoje nebūtinai turi reikšti jų pritaikymą jėginių elementų ir mazgų gamyboje. Didelę naudą galima gauti kompozitines medžiagas naudojant sėdynių, vidaus apdailos ir pan. kur nereikalauja ypatingai didelės kokybės, gamybai.

Pagrindinis rodiklis, dėl kurio pradėta naudoti kompozitus aviacijoje yra tas, kad galima žymiai sumažinti orlaivio svorį kartu išsaugant reikiamas mechanines charakteristikas ir dėl to, kad jos yra atsparesnės mechaniniam nuovargiui. Didžiausios apkrovos lenkimo kryptimi tenka neabejotinai sparnui, taigi, pasirenkant medžiagą reikia, kad ji būtų labai patvari. Kai kurių medžiagų charakteristikos lenkimo apkrovai parodytos (4 pav.)



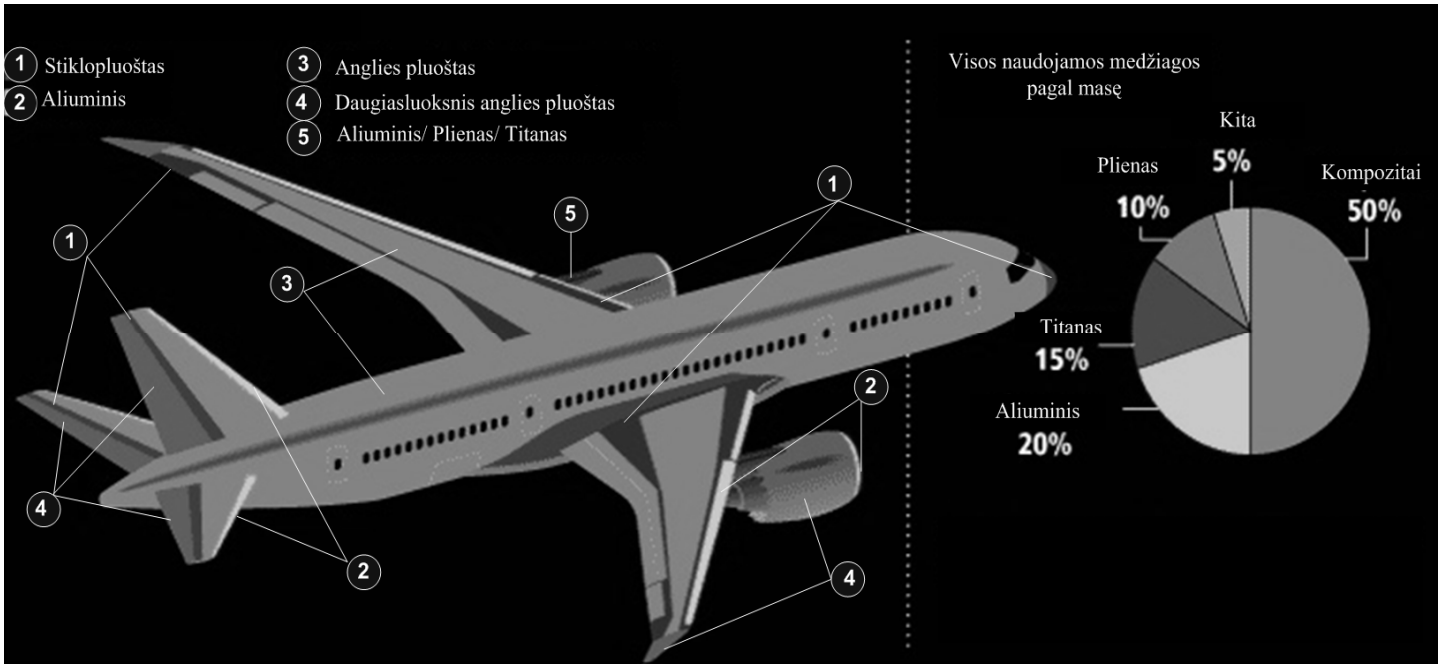
4 pav. Aliuminio ir epoksidinių kompozitų su įvairiais pluoštais apkrovos/deformacijos kreivės [8]

Kaip kompozitinių medžiagų panaudojimo aviacinėse konstrukcijose kiekio didėjimo pavyzdį galima pateikti Boeing gamybos orlaiviuose naudojama kompozitinių medžiagų kiekio pokytį tarp 777 ir 787 serijos. Boeing 777 lėktuve naudojamos įvairios kompozitinės medžiagos kurios sudaro 12 %. Jame iš kompozitų buvo pagamintas horizontalusis stabilizatorius (*angl. tailplane*), grindų sijos ir antraeilės lėktuvo struktūros tokios kaip eleronai (*angl. ailerons*), užsparniai (*angl. flaps*) aukščio vairas (*angl. elevators*), krypties vairas (*angl. rudders*).



5 pav. Boeing 777 konstrukcijoje panaudos kompozitinės medžiagos [27]

Boeing 787 pirmasis civilinis reaktyvinis lėktuvas kuris gaminamas beveik vien iš kompozitinių medžiagų, jų sudėtis parodyta (6 pav.).



6 pav. Boeing 787 konstrukcijoje panaudoti kompozitai [28]



7 pav. Lėktuvas Boeing 787 [6]

Tokio lėktuvo visas kompozitinis fiuzeliažas yra sudarytas iš atskirų cilindro formos dalių, kurioms sujungti reikia 80 % mažiau jungiamųjų detalių ir gali atlaikyti didesnius slėgius negu analogiški tradiciniai, pagaminti iš aliuminio.

1.2 Aviacinių konstrukcijų, pagamintų naudojant kompozitines medžiagas, „darbo sąlygos“, galimi defektai, atsirandantys gamybos ir eksploatacijos metu (apibendrinta defektų klasifikacija)

Nors anglies pluošto kompozitiniai lėktuvo konstrukcijos elementai yra atsparūs įvairioms nusidėvėjimo rūšims, kaip skilimams korozijai ir mechaniniam nuovargiui, jie žymiai lengviau gali būti pažeisti gamybos metu. Dauguma tokių pažeidimų sukelia kompozitų mechaninių charakteristikų suprastėjimą. Žemiau pateiktoje 1-oje lentelėje yra pateikti gamybos metu susidarantys defektai, 2. Lentelėje yra pateiktos pagrindinės defektų atsiradimo priežastys dėl eksploatacijos.

1 lentelė Gamybos metų pasitaikantys defektai [1]

Defektas	Paaiškinimas
Sluoksnių separacija	Atsiskyrimo plotas tarp dvejų kompozito sluoksnių.
Sujungimo nesukibimas	Plotas, kur jungiamos sluoksnių vietos nesukibo
Sluoksnių atsiskyrimas	Plotas su atsiskyrusiomis sluoksnių vietomis
Akytumas	Kietos medžiagos tūryje susidariusių oro ar kitokių dujų ertmės
Šerdies susispaudimas	Šerdies pažeidimas susidaręs dėl smūgio ar pastovaus slėgio poveikio
Pašalinis objektas	Gamybos metų į kompozitą patekusios pašalinės medžiagos

2 lentelė Defektų atsiradimo priežastys ir tipai [2]

Defektas	**Galimos priežastis**
Gamybinio proceso metų atsiradę defektai	
Ertmės	Prasta proceso kontrolė
Sluoksnių atsiskyrimas	Prasta proceso kontrolė Neteisingos skylių gręžimo procedūros Nekokybiškas dalių surinkimas
Paviršiaus žala	Prasta proceso kontrolė

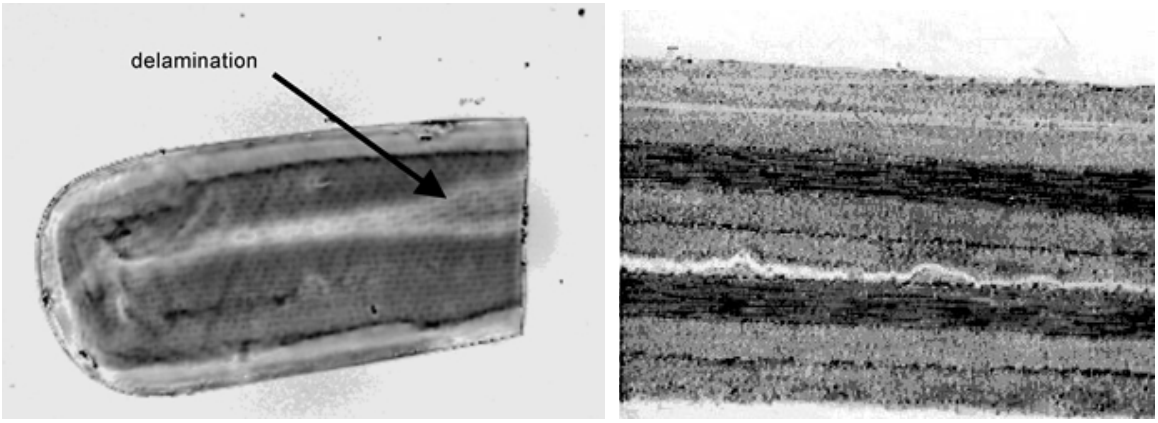
	Blogas valdymas
Blogai išgręžtos skylės	Neteisingas šablonas Neteisingos gręžimo procedūros
Mechaninė žala	
Pjūviai ir įbrėžimai	Neatsargus elgesys
Irimas	Lietaus sukelta erozija
Sluoksnių atsiskyrimas	Įrankių smūgiai Sušalimo ir atitirpimo sukeltas plėtimasis Perkrova surinkimo metu Žaibas / statinė iškrova / lazeris / perkaitimas
Jungčių atsiskyrimas	Jungiamųjų dalių nusidėvėjimas
Skylių pailgėjimas	Medžiagos nuovargis
Įlenkimai / suspausta šerdis	Smūgis, ilgalaikė statinė apkrova
Kraštų apgadinimas	Neteisingas montavimas

Eksploatacijos metu svarbu yra periodiškai tikrinti, ar neatsirado defektų, kadangi orlaivio mazgai skrydžio metu patiria įvairius mechaninus ir aplinkos poveikius, kurie gali pažeisti kompozitinės medžiagos struktūrą. Dažniausiai pasitaikančių defektų eksploatacijos metu yra pateikiama 3 lentelėje

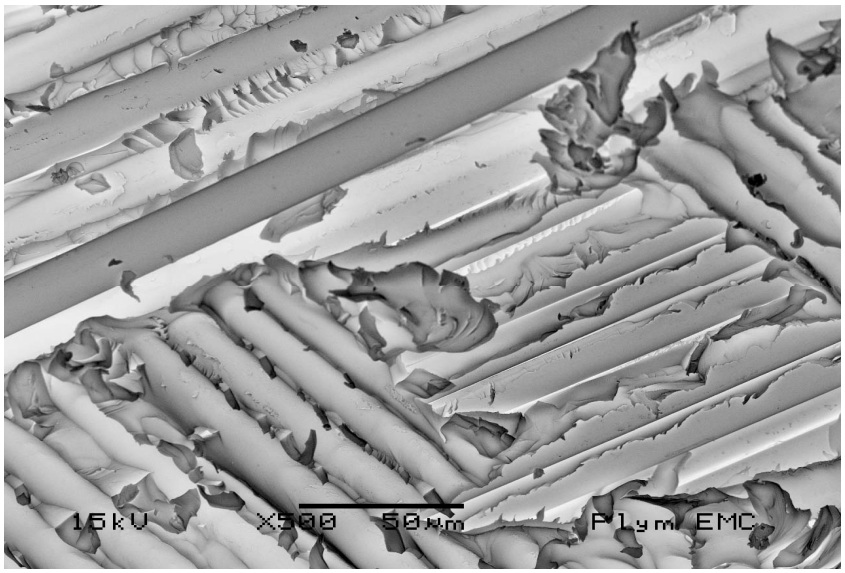
3 lentelė. Dažniausiai pasitaikantis defektai orlaivio eksploatacijos metu [1].

Defektas	Aprašymas
Smūginė žala	Vidiniai kompozito pažeidimai atsiradę susidūrimo su išoriniais kūnais skrydžio metu. Įprastas rezultatas yra išsisluoksniavimas, armuojančio pluošto nutrūkimas ir matricos lūžis
Sluoksnių separacija	Sluoksnių atsiskyrimas kompozito viduje, paprastai atsirandantys dėl netikėtų perkrovų
Nudeginimai žaibu	Medžiagos sritis kuri buvo paveikta aukštos temperatūros, dėl to matrica suyra arba prarandamos jos savybės
Atsiskyrimas	Kompozicinių struktūrų atsiskyrimas dėl išorinių perkrovų ar nusidėvėjusių jungčių
Branduolio degradacija	Korėto kompozito sritis, kur patekęs vanduo sukelia sluoksnių irimą
Paviršiaus iškilimai	Kompozitų paviršiniai pažeidimai dėl neteisingo tirpiklių naudojimo

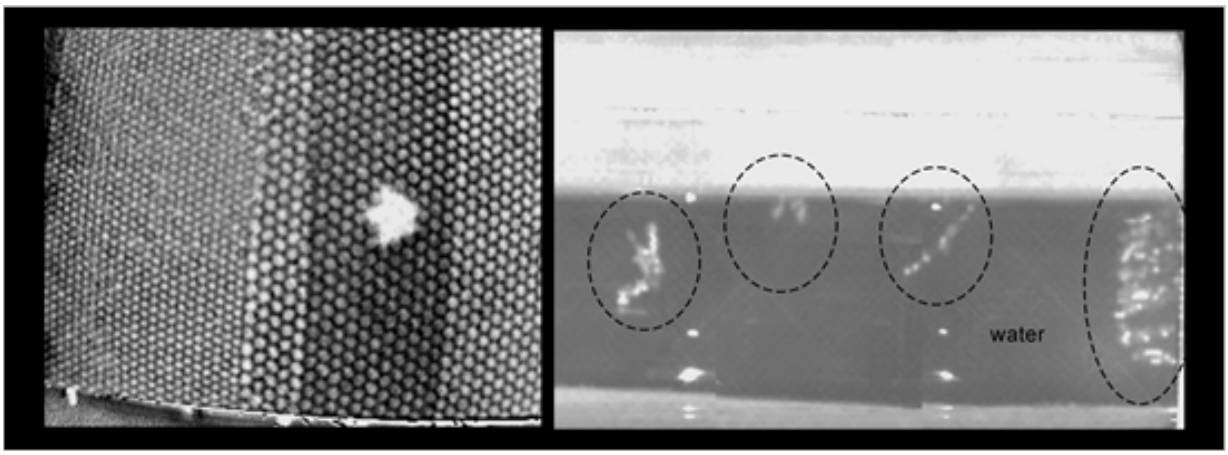
8, 9 ir 10 pav. pateikiami kai kurių defektų pavyzdžiai.



8 pav. Atsisluoksniavimo (separacijos) pavyzdžiai [26]



9 pav. Pluošto ir matricos separacija [10]



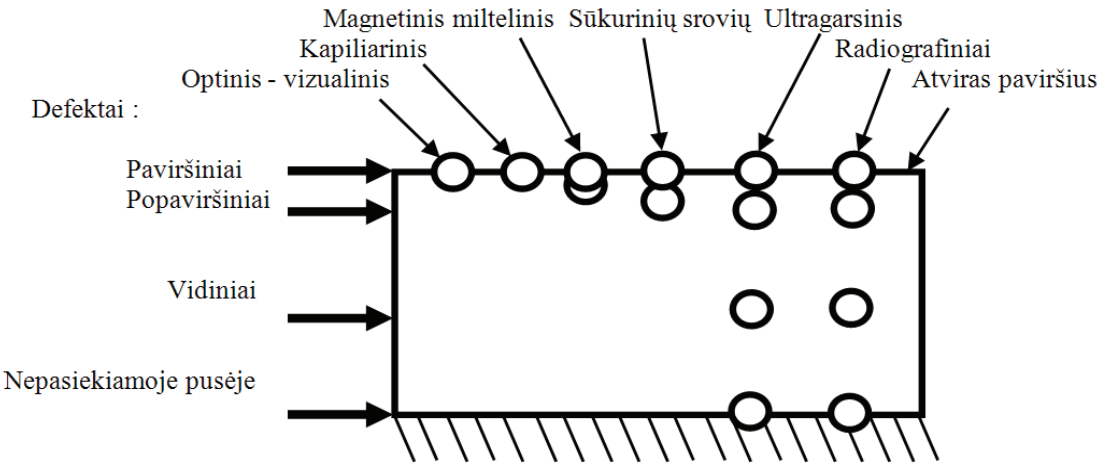
10 pav. Branduolio pažeidimas korėto kompozito po vandens patekimo [26]

1.3 Ultragarsinės neardomosios kontrolės bendri principai ir galimybės pritaikyti juos kompozitinių medžiagų ir konstrukcijų tyrimui

Eksploatacijos metu įvairūs orlaivio konstrukcijos elementai patiria skirtingas apkrovas: tempimo, sukimo, gniuždymo, arba kombinuotas, dėl to iš atsiradusio kuriame nors etape nedidelio defekto gali susidaryti įvairus lūžiai. Dauguma defektų yra nepastebimi pirmiausiai dėl to, kad jie dažniausiai būna medžiagos viduje, ir gali būti gana mažo dydžio, bet toks nepastebėtas defektas turi polinkį kauptis ir didėti, o laiku to nepastebėjus medžiaga praradusi savo mechanines savybes paveikta apkrovos labai greitai suirs. Kad išvengtume netikėto medžiagos suirimo, reikia periodiškai tikrinti visus orlaivio mazgus, kurie patiria ypač dideles apkrovas. Tokius defektus rasti ir atpažinti galime pasitelkę neardomąją kontrolę.

Pagal tai, kokiais fiziniais reiškiniais remiasi, šie metodai skirstomi į akustinius, kapiliarinius, magnetinius, šiluminius, nuotėkių paieškos, elektrinius ir elektromagnetinius (sūkurinių srovių). Pagal pritaikymą, universalių kontrolės metodų nėra, kiekvienas iš jų dažniausiai tinka tik konkretiems uždaviniams spręsti. Gaminant, eksploatuojant ir remontuojant aviacinę techniką, atsakingiausių detalių techninė būklė dažniausiai įvertinama magnetiniais, kapiliariniais, sūkurinių srovių, akustiniais, radiaciniais ir optiniais neardančiosios kontrolės metodais. Tokių svarbių detalių – kaip kompresoriaus ir turbinos mentelės bei diskai, taip pat kitų labiausiai apkrautų konstrukcijų detalių techninės būklės analizė, atliekama neardančiosios kontrolės metodais, leidžia nustatyti detalių darbingumą, laiku aptikti nuovargio plyšius bei intensyvų susidėvėjimą ir pažeidimus, aptikti nuovargio plyšių atsiradimą, nustatyti plyšių dilimo priežastis ir imtis priemonių konstrukcijos gedimams išvengti [31,38].

Aviacinės technikos kontrolei magnetinių miltelių metodu naudojama magnetinė suspensija su feromagnetinių miltelių mišiniu, o kontrolei kapiliariniu metodu – spalvoti, liuminescenciniai skysčiai. Iš akustinių metodų labiausiai yra paplitę ultragarsinis impulsinis bei akustinio impedanso metodai. Iš elektromagnetinių metodų dažniausiai naudojami sūkurinių srovių harmonikos bei impulso metodai, o iš radiacinių – radiografiniai, rentgenografiniai ir gamagrafiniai metodai. Iš optinių labiau yra paplitę optiniai – vizualiniai metodai (naudojant lūpas, endoskopus ir kt.). Išvardintų metodų taikymo galimybės pavaizduotos (11 pav.).

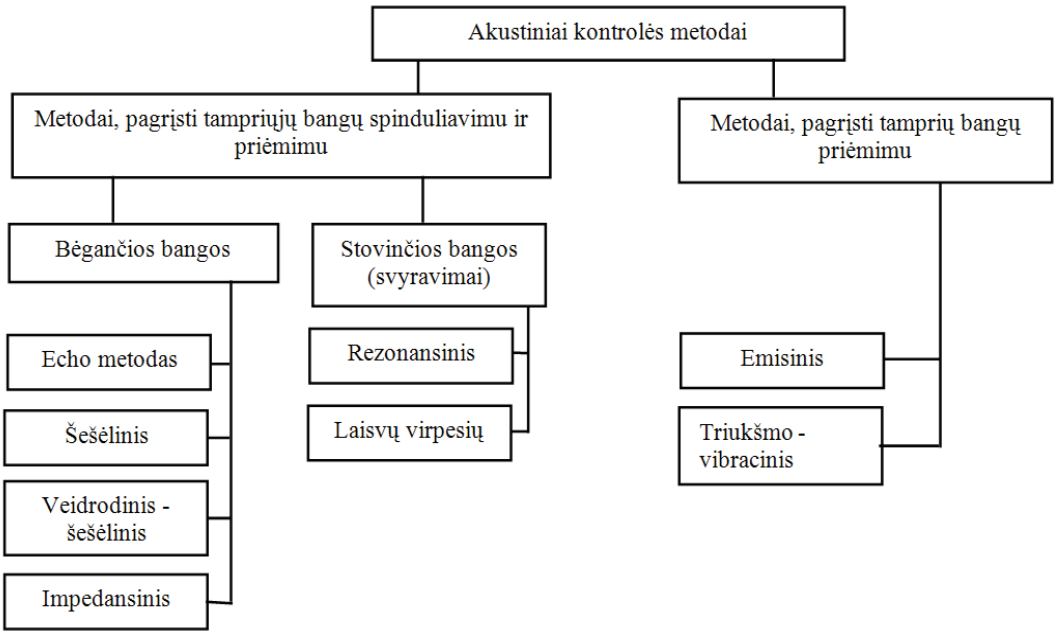


11 pav. Neardomosios kontrolės metodų taikymo galimybės [23]

Giluminių sluoksnių defektus galima aptikti tik ultragarsiniu ir radiaciniu metodais. Tačiau radiaciniai metodai, pavyzdžiui, radiografinis tyrimas rentgeno ir gama spinduliais, tinka tik tais atvejais, kai prie defekto galima prieiti iš abiejų pusių (kasetei su juostele ir spinduliavimo šaltiniui išdėstyti). Tuo tarpu taikant ultragarsinį metodą, pakanka priėjimo iš vienos pusės [23].

Akustiniam neardomosios kontrolės metodui naudojami ultragarsinių ir garsinių diapazonų virpesiai. Virpesių dažnis nuo 50 Hz iki 50 MHz. Virpesių intensyvumas paprastai nedidelis, neviršija 1 kW/cm^2. Tokie virpesiai vyksta aplinkos tamprių deformacijų srityje, kur įtempimai ir deformacijos susiję proporcinga priklausomybe (tiesinės akustikos sritis). Akustinės neardomosios kontrolės metodai plačiai taikomi todėl kad: bangos lengvai įterpiamos į kontrolės objektą, gerai sklinda metale, betone ir kitose medžiagose, efektyvūs naudojant defektų atpažinimui su minimaliu priėjimu prie detalės, jautrūs struktūros ir fizinių – mechaninių medžiagos savybių pokyčiui, nekenksmingi personalui. Akustinės neardomosios kontrolės galimybes praplečia tai, kad priklausomai nuo tiriamų medžiagų savybių, naudojami įvairūs tampriųjų bangų tipai: išilginės, skersinės (šlyties) ir paviršinės bangos. Išilginės ultragarsinės bangos pasižymi didžiausiu sklidimo greičiu, kuris nustatomas adiabatiniu spūdumu β ir medžiagos tankiu ρ : $c = \frac{1}{\sqrt{\rho\beta}}$. Paviršinių ir normalinių ultragarso bangų sklidimo greitis yra dar mažesnis nei skersinių bangų. Normalinių bangų greitis daugiausia priklauso nuo ultragarsinių virpesių dažnio ir aplinkos sluoksnio, kuriuo jos sklinda, storio. Šios normalinių ultragarsinių bangų savybės plačiai naudojamos plonų lakštų, plėvelių ir vamzdžių neardomajai kontrolei tam, kad rastume defektus išsidėsčiusius ne tik skersai, bet ir išilgai bangų sklidimo krypčiai [19].

Paprastai akustiniai neardančiosios kontrolės metodai skirstomi į dvi dideles grupes: naudojantys akustinių bangų spinduliavimą ir priėmimą (aktyvieji metodai) ir pagrįsti tik bangų priėmimu (pasyvieji metodai). Kiekvienoje grupėje galima išskirti metodus, pagrįstus bėgančiųjų ir stovinčiųjų bangų arba svyravimų tyrimo objekte atsiradimu. Akustinių metodų klasifikavimas parodytas 12 pav.



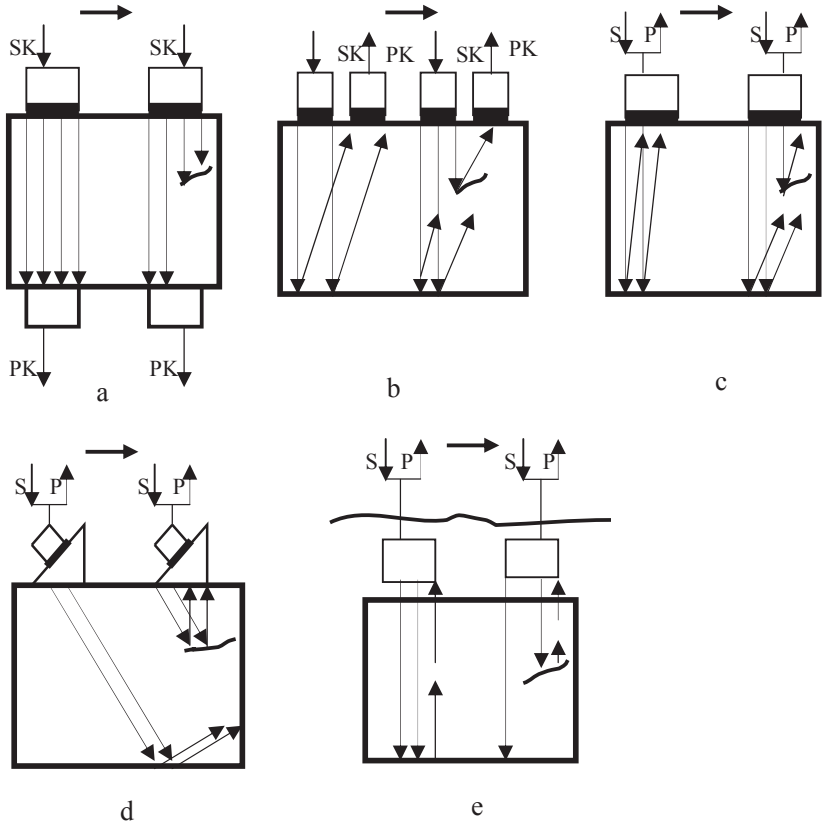
12 pav. Akustinių kontrolės metodų klasifikavimas [23]

Aktyvieji akustiniai metodai, kuriuose naudojamos bėgančiosios bangos, dalinami į du pogrupius, naudojančius bangų praėjimą ir atspindį. Naudojamas tiek nuolatinis, tiek ir impulsinis spinduliavimas. Praėjimo metodams skiriami šie:

1. *Šešėlių metodas.* Šis metodas pagrįstas praėjusios bangos amplitudės sumažėjimu dėl defekto. Laikinis šešėlinis metodas pagrįstas impulso vėlavimu dėl defekto aplenkimo.
2. *Veidrodinis – šešėlinis metodas* pagrįstas signalo, atspindėto nuo priešingos gaminio pusės (dugninio signalo), susilpnėjimu.
3. *Velosimetrinis metodas* pagrįstas tampriųjų bangų greičio pasikeitimu dėl defekto. Pavyzdžiui, jeigu ploname gaminyje sklinda išgaubtinė banga, tai išsisluoksniavimo atsiradimas sumažina jos greitį, kuris paprastai išmatuojamas pagal praėjusios bangos fazės poslinkį.

Atspindžio metoduose naudojamas impulsinis spinduliavimas. Šiam pogrupiui priskiriami šie defektoskopijos metodai:

1. *Echo metodas* registruoja atspindžius nuo defektų.
2. *Veidrodinis echo metodas* pagrįstas impulsų veidrodiniu atspindžiu nuo defektų, orientuotų vertikaliai paviršiui, nuo kurio kontroliuojama.
3. *Delta metodo* ypatumas tas, kad išsisklaidžiusios nuo defekto bangos priimamos tiesiog virš defekto. Šis metodas leidžia gauti plane suvirinimo siūlių defektų atvaizdus.
4. *Reverberacinis metodas* skirtas sluoksninių konstrukcijų, tokių kaip metalas - plastikas, kontrolei. Šis metodas pagrįstas ultragarsinių impulsų reverberacijos trukmės viename iš sluoksnių analize. Pavyzdžiui, kai keitiklis yra ant metalo sluoksnio, ultragarsinės bangos dalinai atsispindi nuo metalo ir plastmasės ribos, o dalinai pereina į plastmasę, tai sąlygoja reverberacijų slopinimą. Esant nekokybiškam medžiagų sujungimui, atspindėjimas nuo jų atsiskyrimo ribos bus didesnis ir reverberacijų trukmė pailgės [23].



13 pav. Pagrindiniai ultragarsinės neardančiosios kontrolės metodai: a – praėjimo (šešėlių metodas, laikinis šešėlinis metodas, velosimetrinis metodas); b – dviejų keitiklių atspindžio; c – vieno keitiklio atspindžio; d – kampu įvedamo spindulio; e – panardinimo [32]

Nuo apžvelgtų akustinių neardančiosios kontrolės metodų iš esmės skiriasi impedansinis metodas. Jis pagrįstas kontroliuojamo paviršiaus, su kuriuo sąveikauja keitiklis, mechaninio impedanso pasikeitimu. Apie impedanso pokytį sprendžiama pagal keitiklio svyravimų charakteristikas: dažnį, amplitudę, fazę. Keitikliai būna pjezoelektrinio strypo arba plokštelės pavidalo.

Naudojant stovinčias bangas, sužadinami laisvi arba priverstiniai svyravimai visame kontrolės objekte (integralinis metodas) arba tik jo dalyje (lokaliniai metodai). Laisvieji svyravimai objekte dažniausiai sužadinami mechaniniu smūgiu, o priverstiniai – veikiant harmoninei jėgai, kurios dažnis keičiasi. Objekto būsena (defektų nebuvimas) analizuojamas pagal jo laisvų svyravimų dažnį arba pagal priverstinių svyravimų rezonansus. Rečiau naudojama atitinkamų svyravimų amplitudę. Stovinčių bangų naudojimu pagrįsti šie metodai:

1. *Laisvųjų svyravimų lokalinis metodas.* Šis metodas pagrįstas tuo, kad kontroliuojamo gaminio dalyje vibraciniu plaktuku sužadinami mechaniniai svyravimai ir analizuojamas sužadinamų dažnių spektras. Gaminiuose su defektais spektras pasislenka į aukštesnio dažnio pusę.
2. *Laisvųjų svyravimų integralinis metodas* pagrįstas vibracijų sukėlimu mechaniniu smūgiu visame arba didesnėje gaminio dalyje.
3. *Lokalinis rezonansinis metodas* buvo plačiai naudojamas storio matavimui. Gaminio sienelėje keitiklio pagalba sužadinamos ultragarsinės bangos. Pagal rezonansinius dažnius nustatomas sienelės storis.
4. *Integralinis rezonansinis metodas* naudojamas paprastų geometrinių formų gaminių tamprumo modulių nustatymui. Nustatomi gaminio išilginių, išlenktinių arba sukamųjų svyravimų rezonansiniai dažniai.

Priverstinių svyravimų metodui priskiriamas *akustinis – topografinis metodas*. Jo esmė yra tokia: kontroliuojamas paviršius padengiamas milteliais, kuriais registruojamas tampriųjų svyravimų amplitudžių pasiskirstymas kontroliuojamame paviršiuje. Defektinis ruožas pasižymi svyravimo amplitudės dėl rezonansinių reiškinių padidėjimu, dėl to ant jo mažiau nusėda miltelių.

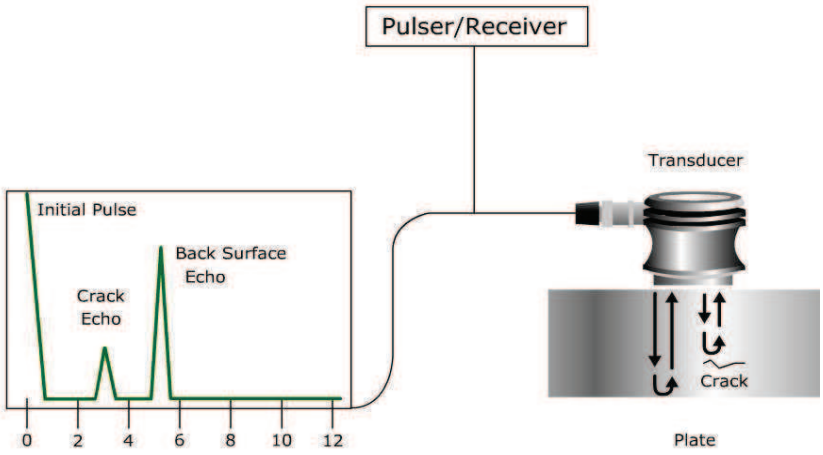
Charakteringiausias pasyvus, naudojantis bėgančias bangas, metodas yra *akustinis – emisinis metodas*. Vykstant akustinei emisijai, tampriosios bangos spinduliuojamos pačios medžiagos dėl jos vidinės struktūros dinaminio lokalinio persitvarkymo. Kontaktuojantys su gaminiu pjezokeitikliai priima tampriąsias bangas ir leidžia nustatyti jų šaltinio (defekto) vietą [25].

Pasyvieji akustiniai metodai, pagrįsti stovinčių bangų arba svyravimų kontrolės objekte sužadinimu, yra šie:

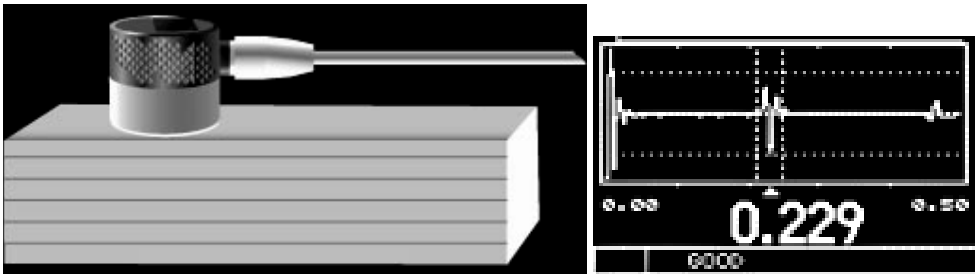
1. *Vibracinis – diagnostinis metodas*. Jis pagrįstas detalės vibracijos parametrų analize naudojant kontaktinio tipo imtuvus.
2. *Triukšmo diagnostinis metodas*. Dirbančio mechanizmo triukšmai analizuojami naudojant mikrofonus.

Iš gaunamo atspindėto signalo galima nustatyti defekto buvimo vietą ir jo orientaciją, signalo elgesys priklausomai nuo defekto pobūdžio gali būti įvairus, jei įtrūkimas tai signalas atsispindi, jeigu ertmė tai signalas išsisklaido.

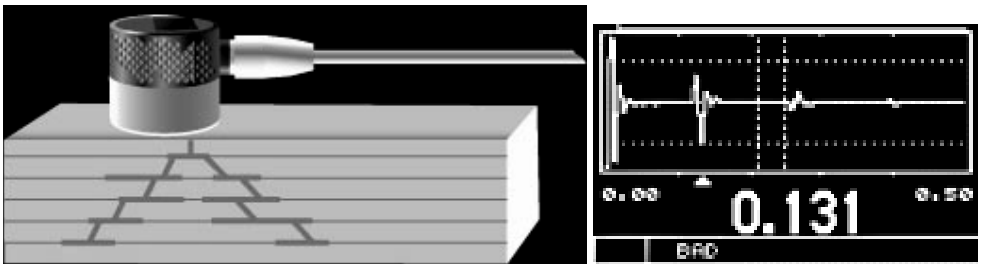
Defektų aptikimo pavyzdžiai:



14 Pav. Signalo nuskaitymo principo pavyzdys [35]

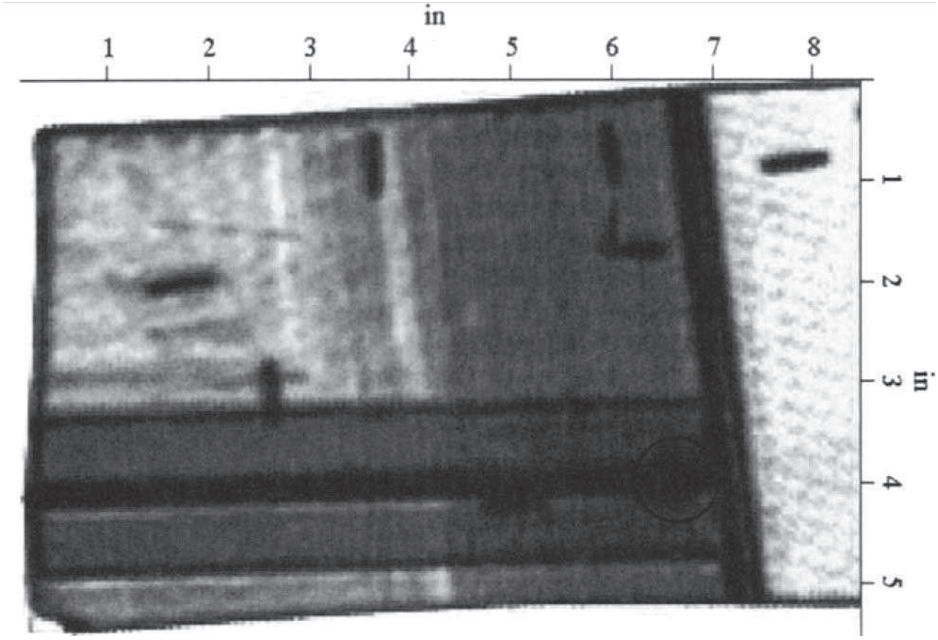


15 Pav. Atspindžio signalo pagavimas nuo vientiso daugiasluoksnio kompozito [15]



16 pav. Atspindžio signalo pagavimas nuo kompozito su išsluoksniavimo defektų [15]

Jeigu naudojama bus medžiaga, kurios storis bus didesnis negu ta, kuriai sukalibruotas prietaisas, tai atspindžio signalas bus gaunamas už kalibravimo ribų. Gauti duomenys dažniausiai yra atvaizduojami perduoto signalo funkcija viename tiriamos medžiagos taške. Joje matome signalo amplitudę ir atstumą. Esant defektams, pastarieji duomenys yra iškraipomi. Šiuos duomenis kaupiant, galima sudaryti tiriamos medžiagos atvaizdą – nuotrauką. Joje defektai yra išsiskiriami remiantis kontrasto skirtumu tarp defektų ir juos supančios medžiagos (17 pav.).

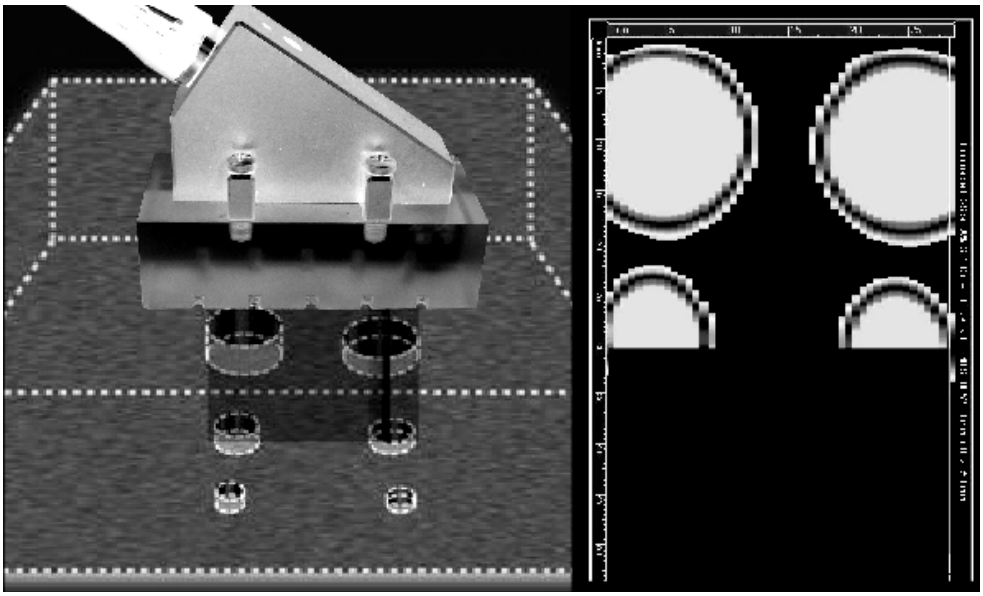


17 pav. Ultragarso bangos reakcija į defektus [3]

Ultragarso impulsinės echoskopijos metodai plačiai taikomi moksliniuose tyrimuose , gamyboje ir orlaivių eksploatacijoje, atliekant aviacinių konstrukcijų defektoskopiją [6] Tiriant šiais metodais, kontroliuojamo objekto kokybė nustatoma pagal ultragarso bangų echoimpulsų laikines – amplitudines charakteristikas. Tačiau tokia analizė apsunkina silpnai išreikštų išskaidytų defektų aptikimą ir įdentifikavimą kompozitinių medžiagų konstrukcijose , ypač vertinant atskirų detalių sujungimų kokybę. Metodo informatyvumas gali būti padėjęs, nustatant kompozitinių medžiagų slopinimo parametrus, įprastos konstrukcijų defektoskopijos metu. Žinomi slopinimo koeficiento

nustatymo metodai nehomogeninėse medžiagose remiasi, kaip taisyklė, aplinkos ir ultragarso sąveikos proceso tiesiniu priartėjimu su apriioriniu slopinimo koeficiento dažninės priklausomybes charakterio apibūdinimu, tuomet kai funkcinė ultragarso slopinimo koeficiento priklausomybė nuo dažnio polimerinėse ir kompozitinėse medžiagose gali keistis nuo tiesinės iki kvadratinės, priklausomai nuo medžiagos tipo ir fizinės būsenos [30].

Aviacinėje technikoje vis dažniau neardomajai kompozitinių medžiagų kontrolei pradedama naudoti ultragarsinę echoskopiją. Šio tipo neardomosios kontrolės metodo akustinis vaizdas yra formuojamas naudojant objekto dvimačio vaizdo ir signalo išrinkimą nustatytais laiko momentais, tai yra *C* skanavimo būdo metu, akustinio vaizdo formavimo principas. Vaizdo formavimui galime panaudoti mechanines pavaras arba akustinę anteninę gardelę su valdomu spinduliu. Pirmuoju metodu turėsime lėtai veikiančią sistemą, antru atveju gali iškilti sunkumų su akustinės gardelės spindulio valdymu. Taigi kompromisinis sprendimas būtų naudoti mechaninį skanavimą viena kryptimi ir elektrinį akustinės gardelės spindulio valdymą kita kryptimi [7,11]. *C skanavimo būdo* ir akustinio vaizdo formavimo proceso pavyzdys parodytas (18 pav.). Pavyzdyje parodytos akustinės gardelės elektrinis spindulys skenuoja iš kairės į dešinę, o pati gardelė mechaniškai juda į mus ir gaunamas akustinis vaizdas, parodytas dešinėje. Panašus į šį skanavimą yra *A skanavimo būdas* ten tik naudojamas vienos antenos siųstuvas-imtuvas ir skenavimas abiem kryptimis vykdomas mechaniškai. Kad padidintume ultragarsinės kontrolės testavimo greitį ir patikimumą, naudojamas neardomosios kontrolės automatizavimas ir skaitmeninis valdymas, be to tai leidžia gauti dvimačius ir trimačius medžiagos defektų vaizdus.

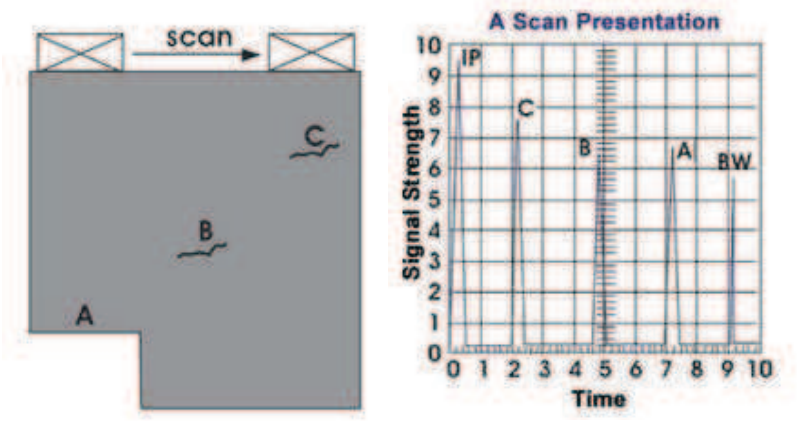


18 pav. *C skanavimo būdu* vaizdo formavimo procesas [16]

2 KOMPOZICINĖS MEDŽIAGOS SRUKTŪRINIŲ ECHOSKOPINIŲ VAIZDŲ FORMAVIMO GALIMYBĖS IR BŪDAI

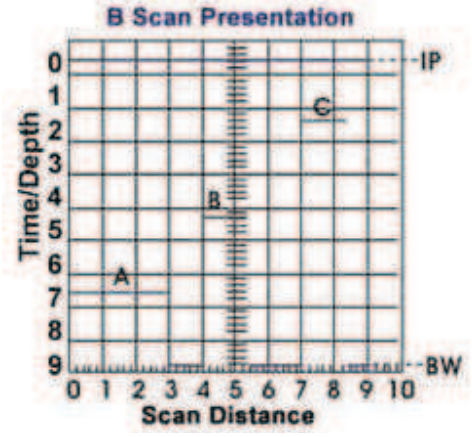
Echoskopiniai duomenys gali būti surenkami ir atvaizduojami keliais formatais. Labiausiai, neardomojoje kontrolėje, paplitę yra 3 skenavimo formatai : *A* būdas, *B* būdas ir *C* būdas. Kiekvienas formatas leidžia skirtingai pažvelgt ir įvertinti tiriamą medžiagos plotą.

***A* būdo** skenavimas atvaizduoja gautos ultragarso energijos kiekį kaip laiko funkciją, santykinis defekto dydis gali būti nustatomas sulyginant signalo amplitudę, gautą nuo žinomo atspindžio su nežinomu atspindžių. 19 pav. parodyta *A* būdo skenavimo vaizdavimas, pirmasis impulsas IP yra atspindys nuo medžiagos dalies esančios prieš pat keitiklį. Toliau slenkant keitiklį gaunami kiti atspindžiai BW signalas yra nuo galinės detalės senelės, tokiu būdu žiūrint pagal atspindžio pasirodymo laiką, galima spręsti, kurioje vietoje yra defektas.



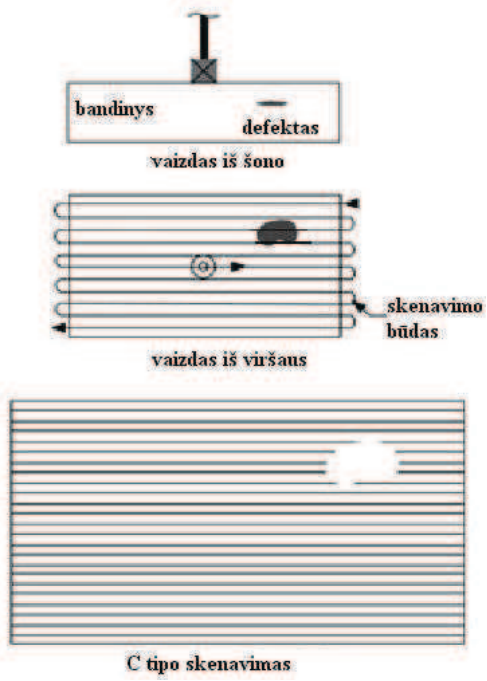
19 pav. Skenuojamas medžiaga ir A tipo skenavimo duomenų gavimas [30]

***B* būdo** skenavimo vaizdo sudarymas pagristas akustinio signalo sklidimo laiko matavimu, tokiu būdu atliekant skenavimą galima nustatyti defekto dydį keitiklio slinkimo kryptimi. Pats B tipo skenavimas vyksta sudarant trigerio užraktą (angl. Trigger gates), kai atspindėtos energijos dydis yra pakankamas trigerio atsidarymui yra fiksuojamas atspindys , gaunamas vaizdas parodytas (20 pav.). Atkreiptinas dėmesys, kad šio metodo apribojimas yra tam, kad mažesnis atspindys gali būti užmaskuotas didesnio, o atspindžio, esančio arčiau paviršiaus.



20 pav. *B* būdo skenavimo duomenų vaizdavimas [30]

***C* būdo** skenavimas užtikrina planinį, tiriamo objekto vaizdavimą atsižvelgiant į jo vietą ir dydį. Gaunamo vaizdo plokštuma yra lygiagreti keitiklio plokštumai, tokie vaizdai sudaromi dažniausiai automatinio duomenų kaupimo sistema, pavyzdžiui, kompiuterių valdoma skenavimo sistema. Paprastai duomenys fiksuojami pagal akustinio signalo amplitudę arba pagal bangos sklidimo laiką ir rezultatas fiksuojamas reguliariais laiko tarpais. Amplitudės ar sklidimo laiko santykiniai dydžiai vaizduojami ekrane pilkos arba kitokios spalvos atspalvių kiekvienai gautai duomenų pozicijai. *C* būdo skenavimu daromo vaizdo savybės atspindi garso sklidimą bandinio viduje ir paviršiuje. Šiuo būdu atliktas skenavimas gali duoti labai didelės skiriamos gebos vaizdą, tai leidžia stlikti detalius gauto rezultato nagrinėjimus. Ribojant atspindėtos amplitudės priėmimo slenkstį galima pasirinkti ir gylį, nuo kurio bus priimamas rezultatas (22 pav.).



21 pav. *C* būdo skenavimo vaizdo sudarymas [31]

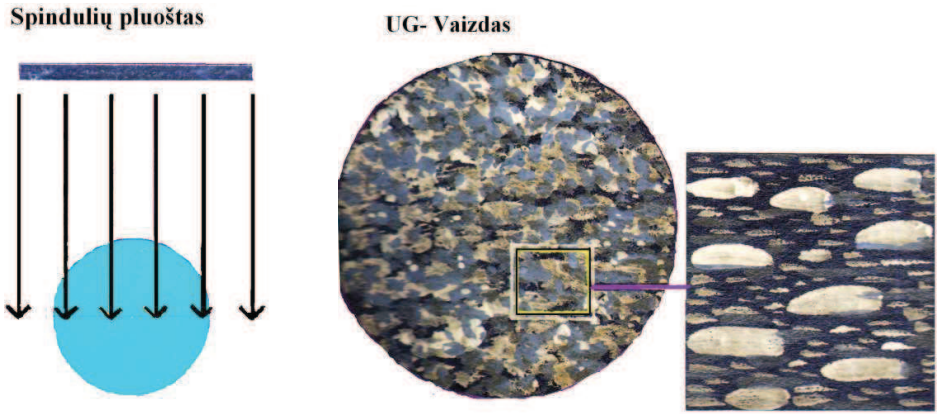


22 pav. Vaizdas sudarytas priimant atspindžius tik nuo bandinio pradinio paviršiaus (kairėje) ir priimant atspindžius per visa bandinį, nuo galinio paviršiaus (dešinėje) [30]

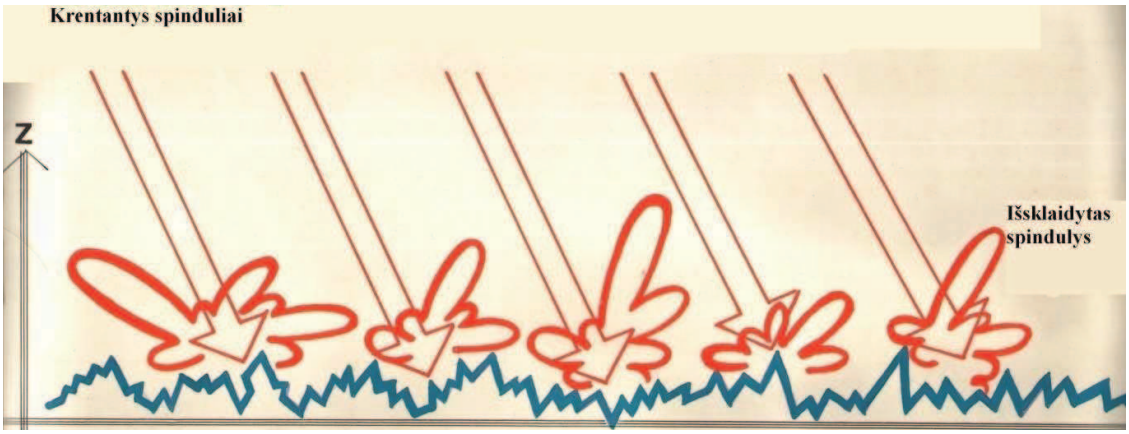
Sudaryti vaizdus ir atpažinti defektus bei nustatyti defekto metmenis ir tikslią jo vietą kompozitinėje medžiagoje ir ne tik nėra taip paprasta kaip galėtu pasirodyti. Ultragarsinio vaizdo gavimą sąlygoja tokie veiksniai kaip: spindulio fokusavimas, skenavimo būdas, ultragarsinio spindulio valdymo būdas bei interferenciniai triukšmai.

2.1 Interferenciniai triukšmai ir spindulio fokusavimo įtaka

Bangai sklindant kompozitine medžiaga, gaunama ganėtinai daug papildomų atspindžių dėl to, kad tai yra nevienalytė struktūra, dalis atspindžių gaunami dėl neidealaus keitiklio ir tiriamos medžiagos paviršiaus sąlyčio. Vykstant daugybiniams atspindžiams nuo struktūros elementų bangos tarpusavyje interferuoja, kadangi bangos sklinda iš vienodo šaltinio tai jos yra koherentiškos, ir nepriklauso nuo to kiek kartų jos atsispindės. Tokios bangų interferencijos ir sklaidos sudaromam vaizdui sukelia papildomo dėmėtumo arba, kitaip sakant, triukšmo, ir dėmės išsitempia, tai apsunkina tolimesnį vaizdo apdorojimą. Tokio reiškinio pavyzdys parodytas (23 pav.).

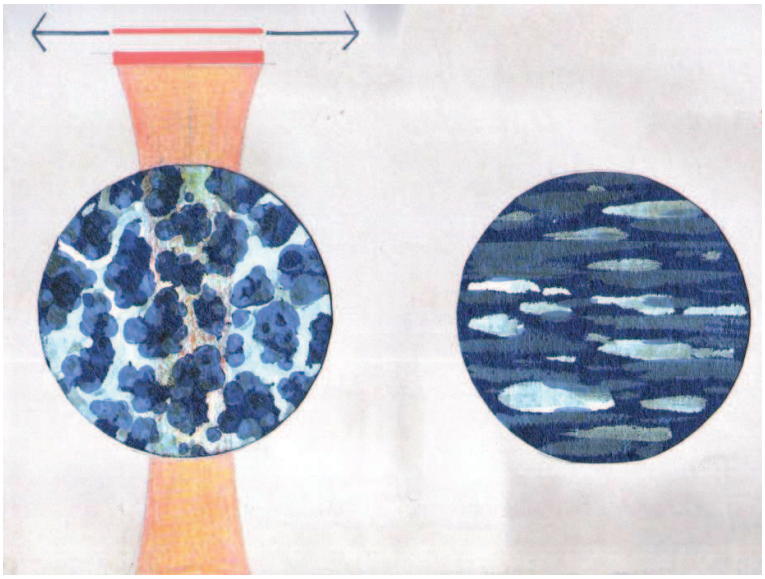


23 pav. Ultragarsinio vaizdo su triukšmu gavimas [39]

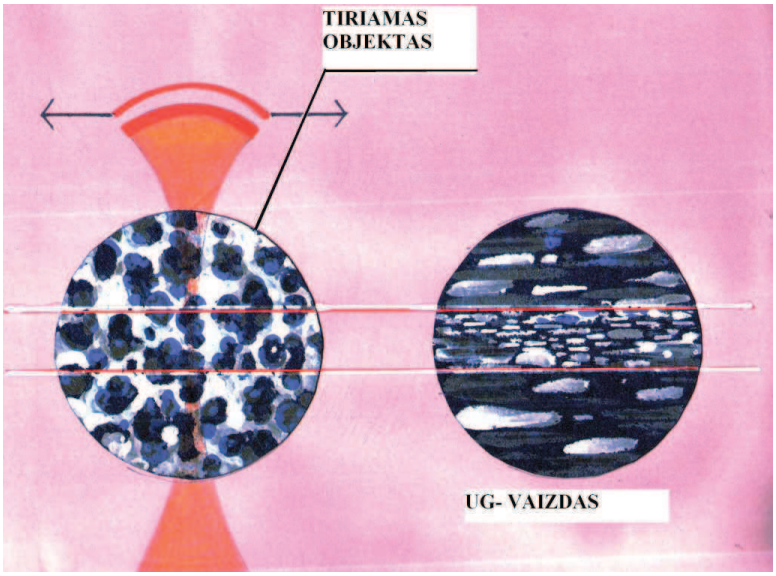


24 pav. Spindulių išsklaidymas [39]

Tam, kad išvengtume ar sumažintume šio efekto įtaką galima naudoti susiaurintą spindulių pluoštą, tada išsklaidymas bus minimizuojamas ir vaizdas nebus ištempiamas. Siekinat pašalinti šį poveikį gali būti panaudotas ir kombinuotas skenavimas. Spindulio fokusavimas vykdomas parenkant keitiklio formą ar kombinuojant keletą keitiklių. Spindulys sufokusuotas gali būti tik tam tikrą atkarpos dalį, todėl idealiai tiesaus spindulių pluošto gavimas reikalauja sudėtingesnės konstrukcijos keitiklių panaudojimo. Tačiau, jeigu mums reikia informacijos iš nedidelio gylio, tai galime panaudoti keitiklį su įgaubtu reflektoriumi darant prielaidą, kad mums reikalingoje atkarpoje sufokusuoto spindulio plotis pakinta nežymiai. Skirtumas tarp vaizdo gaunamo fokusuotu ir nefokusuotu spinduliais parodytas (25 pav. ir 26 pav.).



25 pav. Ultragarsinis vaizdas (deš.) gautas, skenuojant bandinį (kair.) nefokusuotu spinduliu [39]

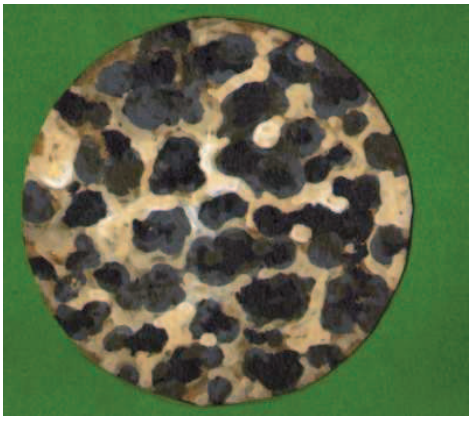


26 pav. Ultragarsinis vaizdas (deš.) gautas, skenuojant bandinį (kair.) sufokusuotu spinduliu [39]

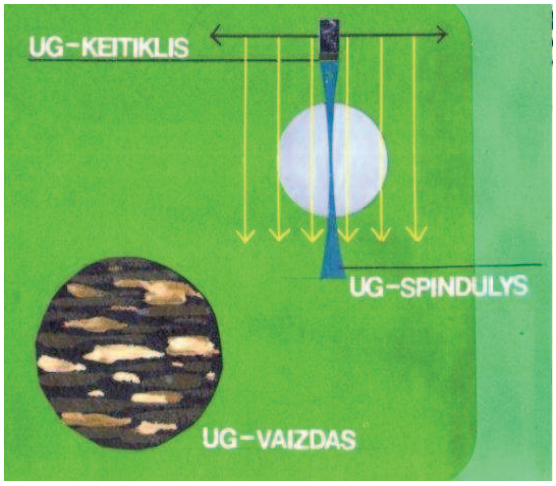
Iš tikrųjų kaip matome dėmių ištempimas lieka, bet skirtumas tas, kad imant tik siaurą zoną išsklaidomo spindulio ir interferencinio triukšmo įtaka nėra tokia pastebima gaunant galutinį rezultatą.

2.2 Skenavimo budo įtaka ultragarsiniam vaizdui

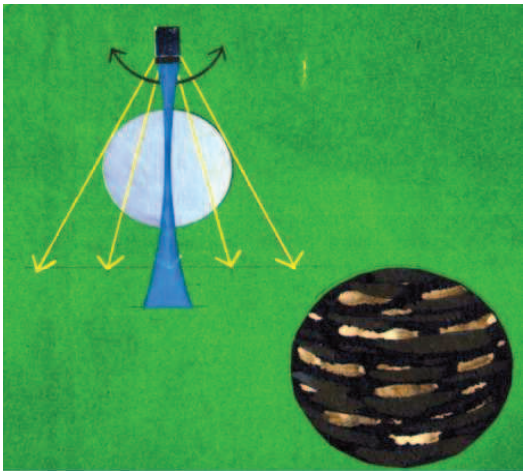
Nežiūrint į jau minėtus atsirandančius triukšmus vaizde, skenavimo metu dar labai svarbus yra ir paties būdo pasirinkimas. Tiesiniu skenavimų padarytas vaizdas yra ištempiamas keitiklio judėjimo kryptimi. Sektorinis skenavimas vykdomas kreipiant spindulių pluošta skirtingais kampais, dėl ko kinta spindulio keliavimo kelio ilgis ir vaizdas kuo labiau į kraštus tuo labiau išsitempia. Bene geriausiai atvaizduojantis esamą struktūra skenavimas yra kombinuotas, kai sudaromas vaizdas iš keleto keitiklių pakreiktu tam tikrais kampais ir kiekvienas iš jų atliekantis sektrorinį skenavimą, rezultate gaunamas vaizdas praktiškai be struktūros iškraipymu.



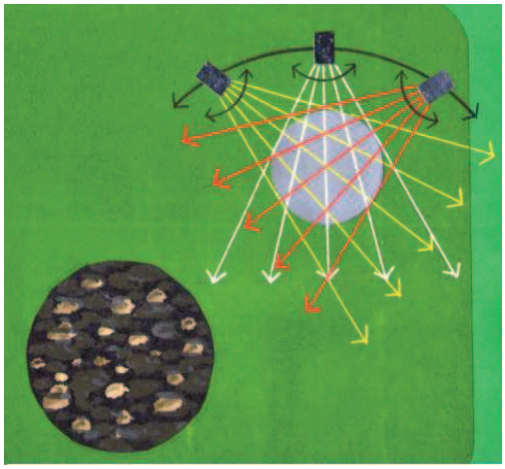
27 pav. Struktūros vaizdas



28 pav. Vaizdas gautas tiesiniu skenavimu



29 pav. Vaizdas gautas sektoriniu skenavimu

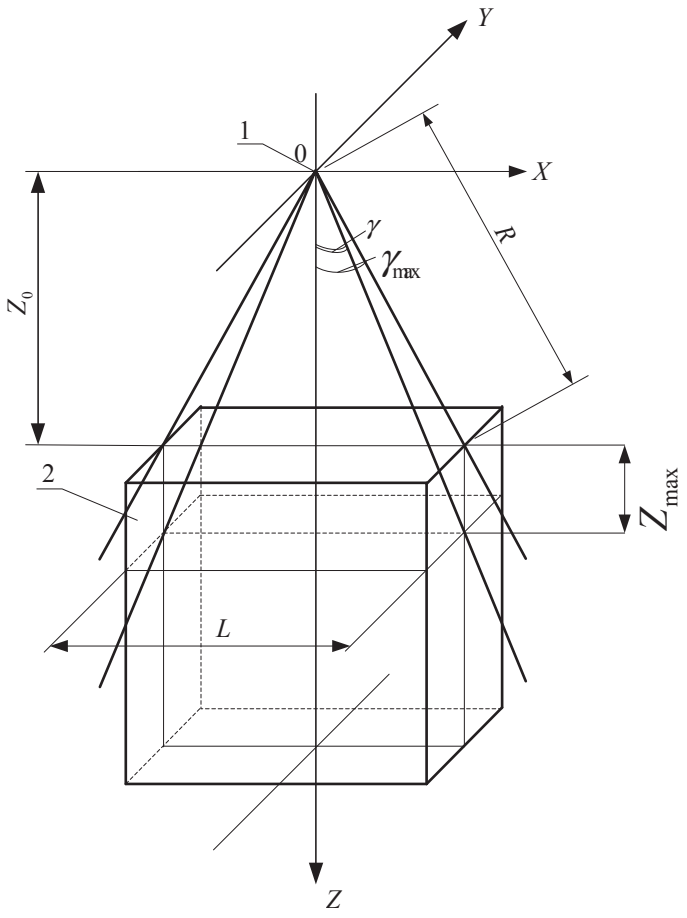


30 pav. Vaizdas gautas kombinuotu skenavimu

2.3 Frontalinio echoskopinio vaizdo formavimo ypatybės ir jo taikymo medžiagos struktūrinei analizei pagrindimas

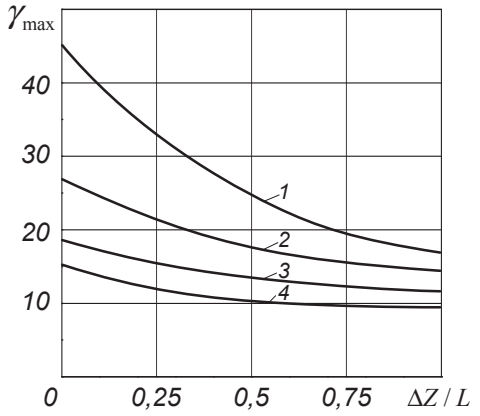
Iš ankščiau aptartų dažniausiai naudojamų skenavimo tipų, aviacijoje kompozitinių medžiagų defektoskopijoje panaudoti patogiausia būtų naudoti C būdo skanavimą, kai vaizdas sudaromas atsižvelgiant į dvimatį objekto vaizdą ir signalo išrinkimą laiko atžvilgių. Šiam skenavimui atlikti galime pasinaudoti mechanines pavaras arba akustinę anteninę gardelę su valdomu spinduliu. Pirmuoju atveju turėsime lėtai veikiančia sistema, antru atveju gali iškilti techninių sunkumų su akustinės gardelės spindulio valdymu. Taigi kompromisinis sprendimas būtų naudoti mechaninį skanavimą viena kryptimi ir elektrinį akustinės gardelės spindulio valdymą kita kryptimi. Mūsų anteninėje gardelėje valdomas spindulys gali būti kaip sektorinio skenavimo metu.

Tarkime, kad turime akustinę anteninę gardelę su ultragarsinių spindulių pluoštu ir skenavimo sektoriaus kampas yra 90^0 [38].

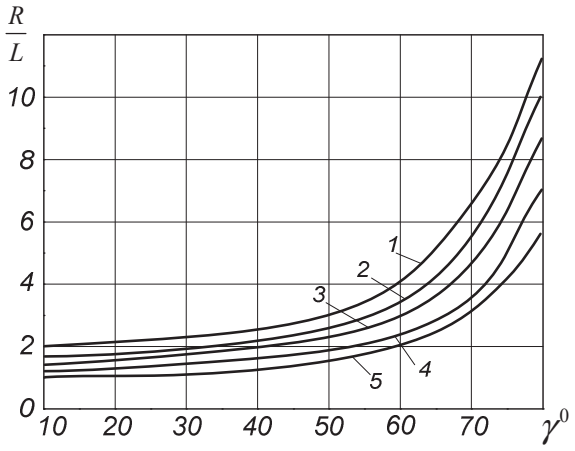


31 pav. Echoskopinio vaizdo formavimo schema: 1 – anteninė gardelė, 2 – tiriamas objektas [29]

Darant prielaidą, kad akustinė gardelė yra koordinačių ašies pradžioje, elektrinis spindulių pluošto valdymas vyksta ZOX plokštumoje ir mechaniškai gardelė slenkama Y ašimi (31 pav.). Ultragarsinio skenavimo tūris bus kubas. Maksimalus skenavimo kampas γ_{max}. Kaip matome, tam, kad palaikytume pastovų duomenų taškų skaičių plokštumoje XOY keičiant kampa γ, turi keistis ir skenavimo gylis. Norint išvengti kaikurių zonų nematomumo gardelę reikia dėti atstumu Z_0 nuo objekto paviršiaus, šis atstumas yra apskaičiuojamas taip: $Z_0 = L\,\frac{ctg\,\gamma_{max}}{2}$, (1) kur L yra skenuojamo objekto išilginis matmuo, γ_{max} yra maksimalus spindulių pluošto atsilenkimo kampas (skenavimo kampas). Maksimalaus skenavimo kampo γ_{max} kitimą aprašome tokia lygtimi: $\gamma_{max}\left(\frac{\Delta Z}{L}\right) = arctg\left(\frac{Z_0}{L} - \frac{\Delta Z}{L}\right)$ svarbu yra žinoti ir kintantį dydį R (arba standartinę reikšmę $\frac{R}{L}$), kuris yra kampo γ funkcija: $\frac{R}{L}(\gamma) = \left(\frac{Z_0}{L} - \frac{\Delta Z}{L}\right) sec\gamma$.



32 pav. Maksimalių skenavimo kampų priklausomybė nuo Frontalinio sektoriaus gylio: 1- 0,5; 2-1; 3-1,5; 4 - 2 [30]

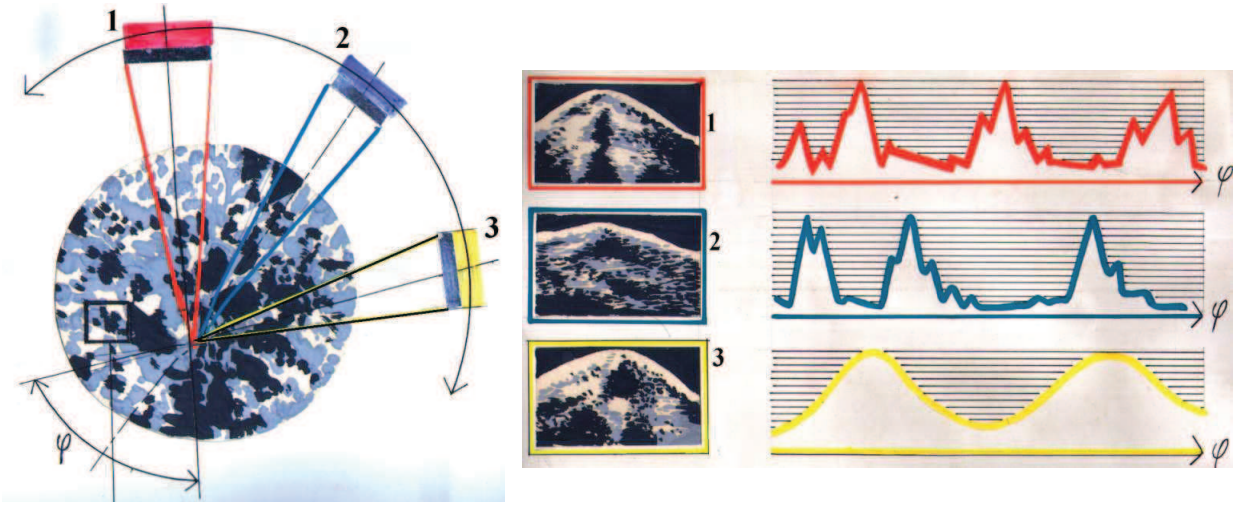


33 pav. Strob impulso vėlinimo priklausomybė nuo skenavimo kampo dydžio.1- 1; 2- 0; 3-0,5; 4 -0,25; 5-0 [30]

Iš diagramų (34 pav.) matome maksimalaus skenavimo kampo kitimą, šis procesas priklauso nuo priekinio sluoksnio gylio (dydis $\frac{Z_0}{L}$ yra pastovus), ši išraiška nėra tiesinė, bet kai $\frac{Z_0}{L}$ >1, funkcija γ_{max} gali būti priimama kaip tiesinė. Diagramose (36 pav.) matome, kad $\frac{R}{L}$ priklausomybė nėra tiesinė esant dideliems skenavimo kampams, bet iki $\gamma = 45^0$ kampo reikšmės visos kreivės turi beveik tiesinę priklausomybę. Panaudojant antenines gardelių frontalinio akustinio vaizdo formavimui ir realizacijai elektroniniuose įrenginiuose, reikia, kad šitie įrenginiai sugebėtų kontroliuoti maksimalu skenavimo kampą ir impulso vėlinimo laiką pagal aukščiau aprašytas lygtis, kurios daugeliu atvejų gali būti pakeičiamos tiesinėmis priklausomybėmis.

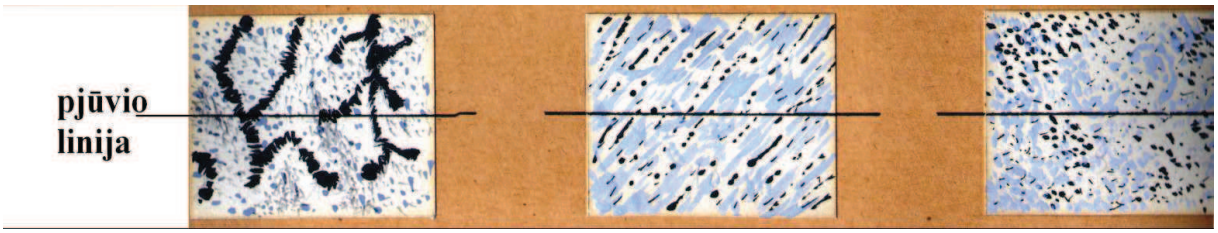
2.4 Struktūrinio ultragarsinio vaizdo analizė, diagnostinių požymių paieška

Gavus struktūrinį ultragarsinį vaizdą galima pradėti jo analizę. Kadangi kompozitinės medžiagos vaizdas gaunamas kaip atspalvių spektras, tai ir vaizdo analizė atliekama nagrinėjant spektro pasiskirstymą.



34 pav. Sklaidos charakteristikos duomenų gautų iš skirtingų keitiklių [29]

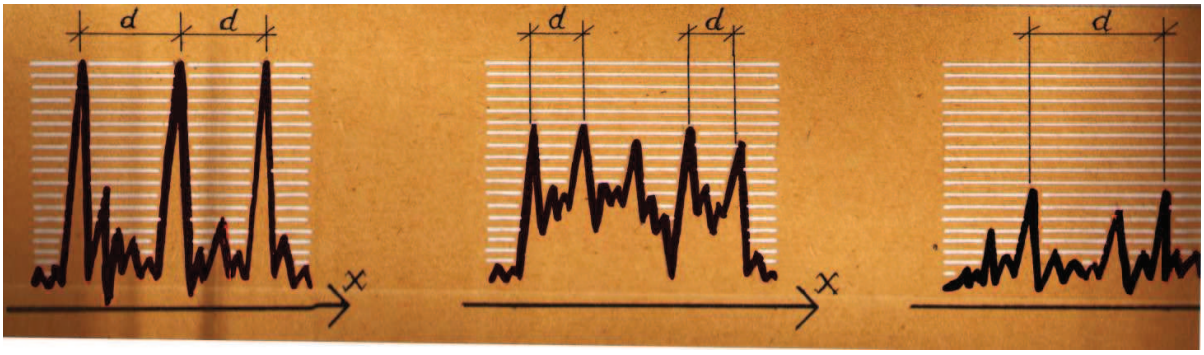
Pagal sklaidos charakteristikas (34 pav.) galime matyti, kad, nors pasiskirstymai skirtingi nuo įvairių keitiklių, tačiau nagrinėjant kiekvieną vaizdą atskirai galima pastebėti, kad yra tam tikrų dėsningumų ir sklaidos charakteristika beveik vienodą, vadinasi nėra kažkokių išsiskiriančių vietų, kurios nebesikartoja. Norint patogiau duomenis analizuoti, duomenų pasiskirstymą būtina statistiškai apdoroti.



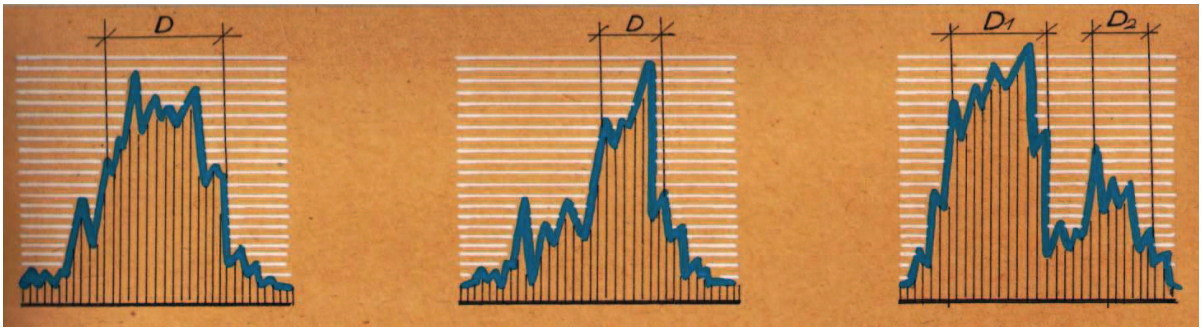
35 pav. Tekstūriniai objekto požymiai [30]

Pavyzdžiui, padarius keletą echogramų turime tokius tekstūrinius objekto požymius kaip parodyta (35 pav.) ir pasirinktoje vietoje darome pjūvį. Toliau galime surinkti duomenis iš pjūvio vietos ir atvaizduoti histogramomis (36 pav.), t.y., kur kaip signalo amplitudė bus imamas taško šviesumas. Iš sudarytų histogramų galime apskaičiuoti duomenų pasiskirstymą (37 pav.). Iš statistinių

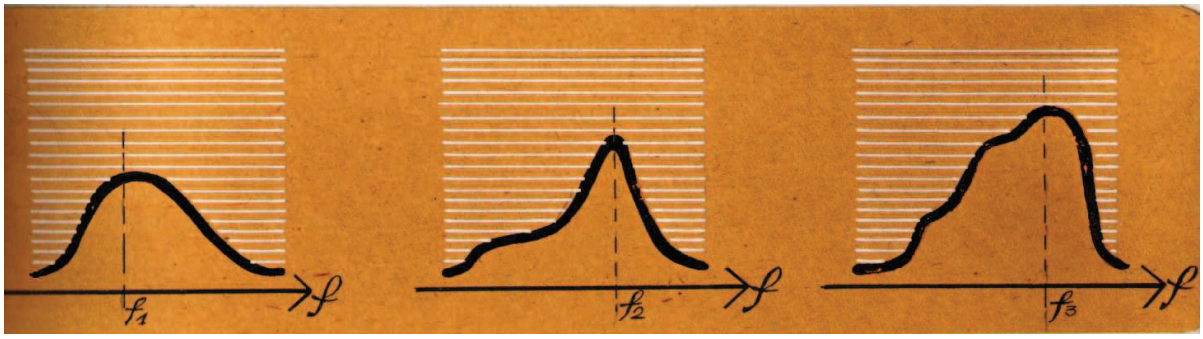
charakteristikų grafikų matome, kad jeigu apibrėšime jas gaubtine (38 pav.), gausis panašus vaizdas į normalųjį (Gauso) skirstinį, šiuo atveju mes galime juo naudotis kadangi, esant dideliam duomenų kiekiui, normalusis skirstinys artimas yra binominiam, tačiau pastarasis yra skaičiuojamas daug sudėtingiau ir skirtumas nuo Gauso yra tik jei turimas duomenų masyvas yra nedidelis. Sudarius normalųjį skirstinį mes gauname objekto struktūros pasiskirstymo dėsnį kurį pasitelkus galima lengvai pastebėti struktūroje atsirandančius pokyčius. Atsiradus kompozitinės medžiagos struktūroje defekto užuomazgų Gauso skirstinyje bus žymus nuokrypis nuo statistinių duomenų.



36 pav. Vaizdo duomenų atvaizdavimas histogramomis [29]



37 pav. Statistinės surinktų duomenų charakteristikos [29]



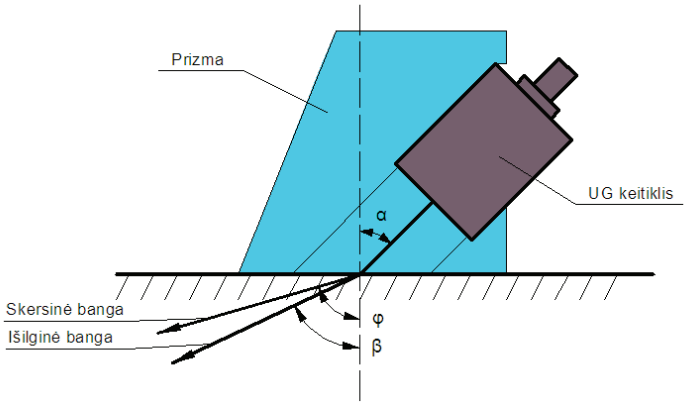
38 pav. Surinktų duomenų vaizdavimas spektrogramomis [29]

2.5 Reikalavimų FVE skiriamajai gebai, ultragarso dažnių diapazonui, matavimų tikslumui ir informacijos apdorojimui bei atvaizdavimui suformulavimas

Tam, kad butu galima gauti, tinkamos kokybės, vaizdą pabandysime nustatyti reikalavimus įrangos parametrams: skiriamajai gebai, ultragarso dažnių diapazonui, matavimo tikslumui bei informacijos apdorojimui.

Aviacijoje naudojamu kompozitinių struktūrų storis gali siekti nuo 0,5 iki keliu centimetru, priklausomai nuo panaudojimo srities. Kompozituose naudojamo armuojančio pluošto diametras yra nuo 50 µm iki 140 µm.

2.5.1 Ultragarsinių bangų sklidimo kompozitinėje medžiagoje charakteristikos



39 pav. Krentančios bangos pasiskirstymas [33]

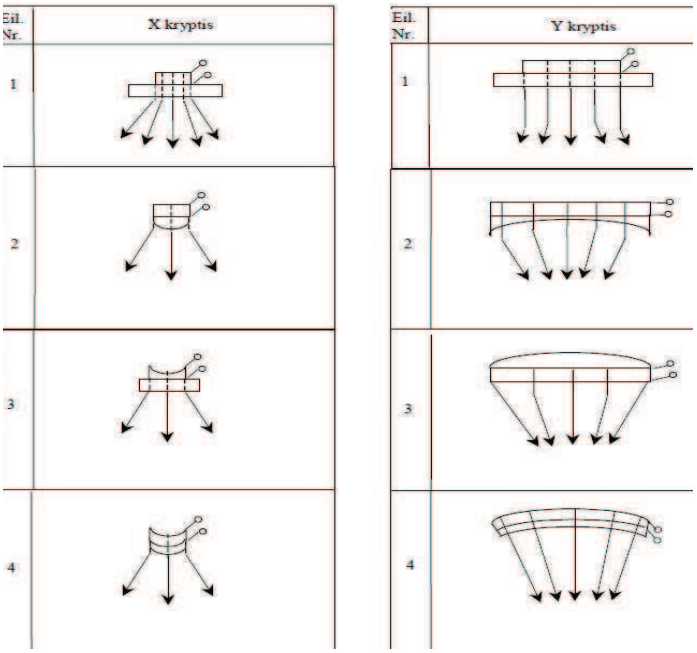
Kai banga sklinda per dviejų skirtingų terpių ribą, krentanti banga pasiskirsto į dvi dedamąsias: skersinę (šlities) bangą ir išilginę. Didinant kampą α, pradžioje išilginės bangos kampas pasiekia kritinį kampą, o toliau didinant kampą ir skersinės bangos kampas pasiekia kritinę ribą. Pasiekus tam tinkamą kampą antroje terpėje atsiranda paviršinė banga, kuri sklinda kūno paviršiuje. 21 paveiksle matoma krentančios bangos pasiskirstymo priklausomybė nuo kritimo kampo.

4 lentelė. Ultragarsinės bangos sklidimas kompozituose [13]

Kompozitinė medžiaga	bangų greitis		Banginė varža Z
	Išilginių (m/s)	šlyties(m/s)	
Stiklo pluoštas	3150	1727	6,04
Grafitas/derva	2972	1956	4,65
Boras/derva	3327	1829	4,38

2.5.2 Ultragarso spindulių pluošto fokusavimas

Vienas iš fokusavimo metodų yra sintetinės apertūros[1] fokusavimo technikos (SAFT) metodas. Šiam metodui reikalingi specialios konstrukcijos pjezokeitikliai, kuriems, be įprastinio reikalavimo jautrumui (ultragarso spindulio sklaidai), keliamas reikalavimas, kad kryptingumo diagrama skenavimo kryptimi būtų labai plati, o kryptimi statmena skenavimo krypčiai - pakankamai siaura. Nuo to, kaip šios sąlygos taikomos, priklauso SAFT rezultatai. Todėl standartiniai pjezokeitikliai negali būti naudojami, arba jie yra mažiau efektyvūs, nei specialiai šiam metodui sukurti pjezokeitikliai. Be to, papildomas reikalavimas SAFT pjezokeitikliams yra juostos plotis, nes, kuo trumpesnis impulsas, tuo geresnė skiriamoji geba. Specialūs reikalavimai SAFT pjezokeitiklių kryptingumo diagramoms įvykdomi skirtingai formuojant akustinius laukus skenavimo kryptimi ir statmenai šiai krypčiai. Dažniausiai tam panaudojamas ultragarso bangų fokusavimo ir defokusavimo savybės arba pasirenkami pjezoelemento parametrai. Tokius keitiklius galima panaudoti akustinės gardelės sudarymui panaudojamus C tipo skenavimo metodo realizavimui. Pagrindiniai SAFT pjezokeitiklių akustinių laukų (ultragarso spindulio) formavimo būdai pavaizduoti pav. 23. Akustinis laukas x ir y kryptimis formuojamas pjezoelementu ir tarpiniu sluoksniu. Paprasčiausiu atveju pjezoelementas ir tarpinis sluoksnis yra plokšti (1 eil.), bet pjezoelemento skersiniai matmenys



40 pav. Ultragarso spindulio formavimo būdai

[1] Apertūra – kampas tarp jonizuojančiojo spinduliavimo kūginio pluošto, patenkančio į elektringųjų dalelių skaitiklį, kraštutinių spindulių.

bent penkis kartus mažesni už išilginius. Todėl x kryptimi kryptingumo diagrama (tolimame lauke) bus kur kas platesnė nei y kryptimi. Šį plotį 0,5 lygyje (-6 dB) galima apskaičiuoti pagal formulę: $\Theta_{0,5} = \arcsin 0{,}72\frac{\lambda}{H}$; o 0,1 lygyje (-20 dB) – pagal formulę: $\Theta_{0,1} = 1{,}08\ arcsin\frac{\lambda}{H}$; čia λ ultragarso bangos ilgis sklidimo aplinkoje, H pjezoelemento plotis arba ilgis. Antroje eilutėje nurodytų pjezokeitiklių kryptingumo diagramos plotį (žr. 41 pav.) lemia ne tik pjezoelemento matmenys, bet ir tarpinio sluoksnio forma; x kryptimi – defokusavimas, y kryptimi – fokusavimas. Abu pjezoelementai yra paprastos pjezokeraminės plokštelės, todėl šios konstrukcijos pjezokeitiklių gamybos technologija nesudėtinga, tačiau dėl išgaubto ar įgaubto tarpinio sluoksnio paviršiaus jie naudojami tik imersiniams (keitiklis nesiliečia su paviršiumi) tyrimams kaip buvo aptarta, formuojant frontalinį vaizdą. Trečioje eilutėje pateikti būdai kryptingumo diagramai formuoti panaudojant pjezoelemento įgaubimus ar išgaubimus. Plokščias suderinimo sluoksnis daro pjezokeitiklį universalų, o skirtingo storio pjezoelementas praplatina keičiamų dažnių juostą.

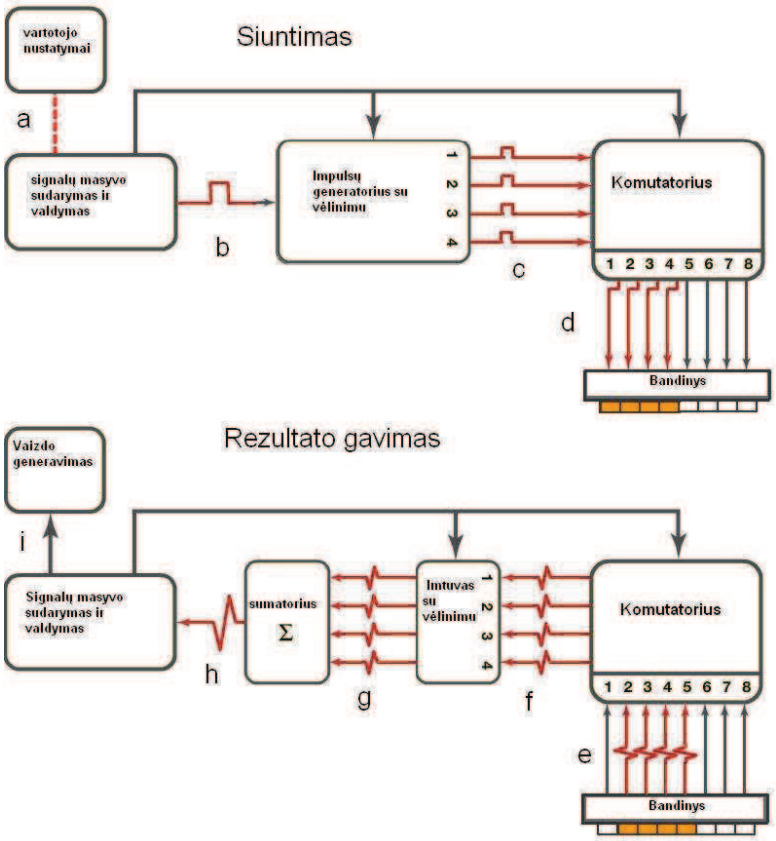
Ketvirtoje eilutėje parodytų pjezokeitiklių abu formavimo elementai yra išgaubti ir įgaubti, todėl jų gamybos technologija sudėtinga, ir jie tinka tik imersiniams[2] tyrimams. Akustinio lauko formavimo elementai, pateikti 41 pav., gali būti jungiami nuosekliai ar lygiagrečiai sudarant sudėtingesnės struktūros pjezokeitiklius norimoms kryptingumo diagramoms gauti. Nuosekliai gali būti jungiami ne du, bet trys ir daugiau tiek aktyvių, tiek pasyvių elementų. Lygiagrečiai elementai gali būti jungiami akustinėse gardelėse. Būtina pažymėti, kad kryptingumo diagramos sąvoka tinka tik tolimam akustiniam laukui. SAFT pjezokeitikliai taikomi tyrimams taip pat ir artimame akustiniame lauke, ir tarpiniame. Šiais atstumais SAFT pjezokeitiklių galimybes tikslinga vertinti ultragarso spindulio skersiniais parametrais. Analitinės kryptingumo diagramų išraiškos čia netaikytinos. Dėl skirtingų skersinių pjezoelemento matmenų artimas pjezokeitiklio laukas X ir Y kryptimis yra nevienodas. Pavyzdžiui, pjezoelemento 4 × 14 mm artimas laukas X kryptimi vandenyje, esant 2,5 MHz dažniui, Zx = 6,6 mm, o Y kryptimi Z4 =81,6 mm.

2.5.3 Kompozitinės medžiagos struktūros vaizdo gavimas

Echoskopinių duomenų surinkimas ir medžiagos struktūros vaizdo sudarymas gali būti įvairus. Echoskopinių duomenų gavimui panaudojus akustine fazinę gardelę *C* būdo skenavimo metu i gardelės elementus signalui paduoti ir nuskaityti, vaizdo sudarymui, yra keletas būdų. Pagrindinis reikalavimas visoms akustinėms gardelėms, yra galimybė konfigūruoti apibrėžtos grupės elementus su užprogramuojamu generatoriaus ir imtuvo vėlinimu, dar gali būti vadinamas fokusavimo dėsnių.

[2] Imėrsinis [imersija], susijęs su panardinimu į skystį, buvimu skystyje.

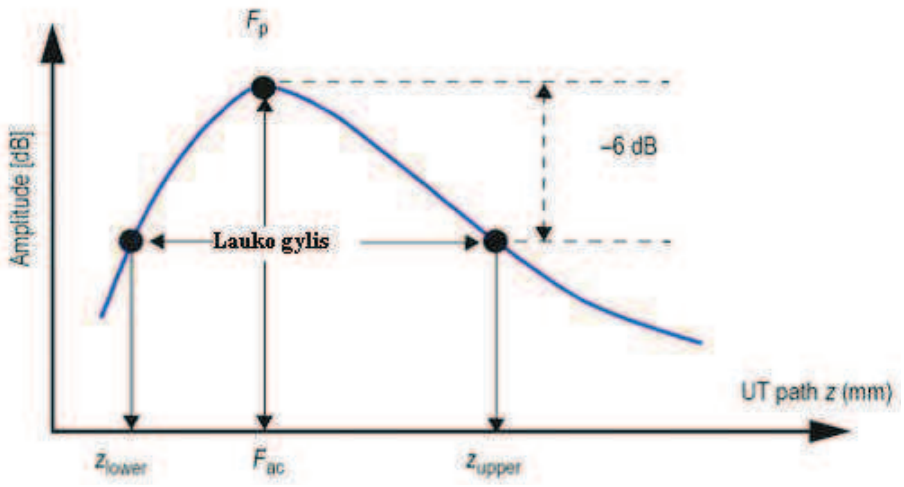
Impulsų siuntimo metu, trigeris nukreipia juos i generatorius su vėlinimu, reikalingu gauti norima signalų pluoštą. Priėmimo metu signalai skaitmenizuojami ir su atitinkančių fokusavimo dėsnį užlaikymu sumuojami ir gaunamas atsako signalas. Gautas atsako signalas vėliau yra sustiprinamas, filtruojamas, skaitmeniškai apdorojamas ir išsaugomas. Kai viena fokusavimo dėsnio seka yra užbaigiama gautas rezultatas atvaizduojamas kartu su A-tipu ir matavimais. Linijinio skenavimo metu, elementų grupes sudaromos per multipleksorių, tai daroma sąnaudų ir elektronikos sudėtingumo lygiui sumažinimui. Bendras tokios sistemos veikimo principas parodytas (42 pav.) sistemoje susidedančioje iš 4 generatorių/imtuvų panaudojama 8 akustinės gardelės elementus. Sektoriniam skenavimui, šiuo atvejų, daugiausiai galima išnaudoti keturis elementus. 42 pav. parodytas linijinio skenavimo būdas , visas ciklas nuo sugeneruoto signalo išsiuntimo iki vaizdo sudarymo gali pasikartoti tuo metu kai vienas pilnai pasibaigia, pasibaigus pirmam ciklui komutatoriuje (*angl. multiplexer*) perstūmiamas signalas per viena gardelės elementą ir tokie ciklai tesiasi kol yra pasiekiamas paskutinysis. Sektorinis skenavimas nuo linjinio skiriasi tuo kad signalas siunciamas yra i pasirinktus gardeles elementus keliais skirtingais suvelinimo lygiais ir tokiu pat budu gaunamas rezultatas apdorojimui.



41 pav. Skenavimo signalo siuntimas ir rezultato gavimas linijinio skenavimo metų.

Spindulių fokuso gylis ir diapazonas

Fokusavimo gylis (F_p) [mm] yra atstumas išilgai akustines ašies maksimalios amplitudės atsakui(43 pav.)

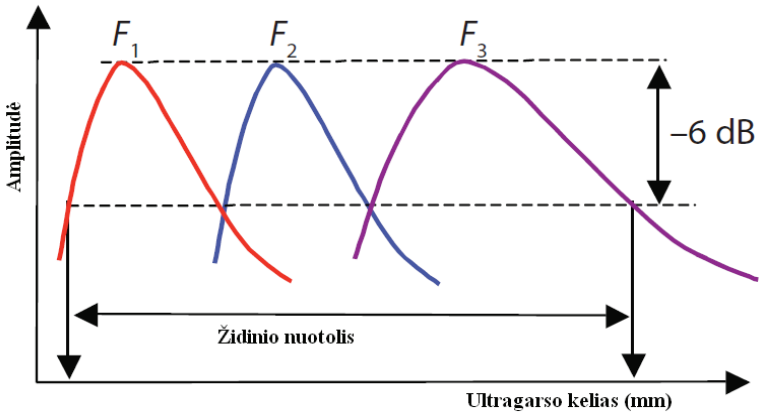


42 pav. Fokusavimo gylio ir lauko gylio nustatymas

Yra keletas fokusavimo būdu (Pav. 4):

- Į Z ašį (kintamas gylis): projekcija
- Į X ašį (pasovus gylis, kampinis): tikrasis gylis
- Į XZ plokštuma: puse kelio
- Konkretus linijos valdymas XZ plokštumoje: fokuso plokštuma

Fokusavimo diapazonas, yra skenavimo atstumas arba gilyn, arba palei ultragarso pluošto ilgį esant daugiakanaliams fokusavimo dėsniais. Fokusavimo diapazonas yra apribotas -6dB atkirtimo būdu, kažkuriais atvejais gali buti ribojimas ir -3dB.



43 pav. Fokusavimo diapazono apribojimai

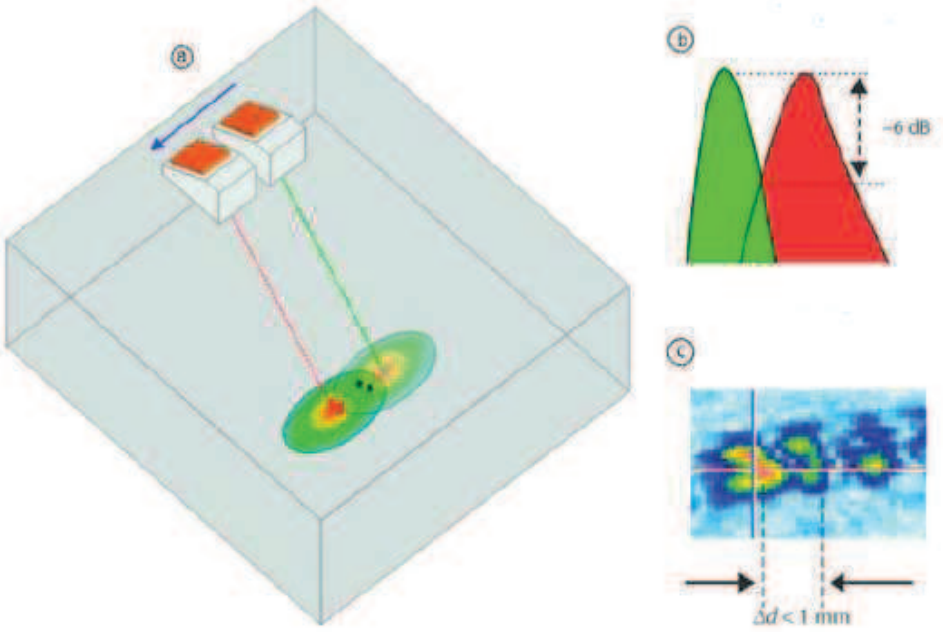
Skiriamoji geba

Ašinė skiriamoji geba, tai yra minimalus atstumas tarp tuo pat kampu akustinėje ašyje išsidėsčiusių skirtingu defektų, kurie dar gali būti teisingai atvaizduoti jeigu amplitudžių mažėjimas yra daugiau negu 6dB nuo maksimalios reikšmes iki žemiausios. Ašinės skiriamosios gebos formulė:

kuo trumpesnis bus impulsas tuo geresnė gausime skiriamąją gebą.

$$\Delta z = v_{\text{test piece}}\,[\text{mm}/\mu\text{s}] \times \frac{\Delta\tau_{-20\text{ dB}}[\mu\text{s}]}{2}$$

Šoninė skiriamoji geba:



44 pav. Šoninė skiriamoji geba (b – dvejų defektų echograma, c – akustinis vaizdas)

Ši skiriamoji geba nusako minimalius atstumus, kuriems esant du skirtingi defektai esantis tame pačiame gylyje gali būti teisingai atvaizduojami. Esant aktyviai ir pasyviai apertūroms šios skiriamosios gebos dydžiams galima atitinkamai pasinaudoti formulėmis:

$$\Delta d_x \approx \frac{0.11\,v_{\text{test piece}}}{f\sin(\theta/2)}, \quad \Delta d = \frac{\Delta Y_{-6\text{ dB}}}{4};$$

kur: d_x – 0,25 spindulių pluošto pločio ties -6dB;

v_{test} – ultragarso greitis tiriamoje medžiagoje;

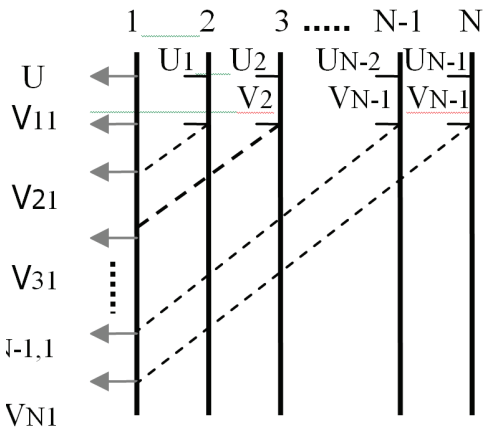
f – testavimo dažnis;

θ – aktyvios apertūros kampas.

2.5.4 Echoskopinių impulsų slopinimo nustatymo algoritmas

Atliekant objektų defektoskopiją ultragarsiniais impulsiniais metodais, tiriamos struktūros kokybės nustatymas priklauso nuo gaunamo echoimpulso laikinės – amplitudinės charakteristikos. Atliekant tokia analizę apsunkinamas kompozitinių medžiagų defektų nustatymas ir identifikavimas ypatingai tu defektu kurie tik pradeda vystytis. Kad galima butu pagerinti tokių defektų nustatymo tikimybę, reikia gerinti gaunamo echoimpulso kokybę, tai realizuojama gali būti nustatant medžiagų slopinimo parametrus defektoskopijos metu. Žinomi slopinimo koeficiento nustatymo metodai nehomogeninėse medžiagose remiasi aplinkos ir ultragarso sąveikos proceso tiesiniu priartėjimu su aprioriniu slopinimo koeficiento dažninės priklausomybes charakterio apibūdinimu, tuomet kai funkcinė ultragarso slopinimo koeficiento priklausomybė nuo dažnio polimerinėse ir kompozitinėse medžiagose gali keistis nuo tiesinės iki kvadratinės, priklausomai nuo medžiagos tipo ir fizinės būsenos, todėl reikia gauti tikslius ir paprastai realizuojamus slopinimo koeficiento nustatymo algoritmus kompozitinėje medžiagoje, nežinant slopinimo koeficiento dažninės priklausomybės dėsnio.

Laikysime, kad tiriama medžiaga sudaryta iš N plokščiai – lygiagrečių absorbuojančių ultragarsą sluoksnių (45 pav.), iš kurių kiekvienas charakterizuojamas priklausomu nuo dažnio f slopinimo koeficientu $\alpha_i(f)\left(i=1,\overline{N}\right)$, *ir* $R_i\left(i=1,\overline{N}\right)$ atspindžio koeficientu nuo i-to absorbuojančio sluoksnio ribos. Tarkime, kad ultragarso slopinimas tiriamos medžiagos sluoksniuose sukeliamas tik absorbcija, koeficientai nepriklauso nuo dažnio, daugkartinių atspindžių tarp sluoksnių nėra, slopinimo koeficiento priklausomybė nuo dažnio nežinoma.



45 pav. Ultragarsinio impulso sklidimo sluoksniuotoje medžiagoje spindulinė schema [24]

Tokiu atveju, echosignalo spektras $G_{i+1}(f)$ nuo $i+1-$mo sluoksnio gali būti išreikštas sekančiais: $|G_{i+1}(f)|=|G_0(f)|\exp\left\{-\sum_{n=1}^{i+1}a_n(f)\Delta r_n\right\}R_{i+1}\prod_{n=1}^{i}\left(1-R_n^2\right)$. [24], kur $G_0(f)-$ zonduojančio impulso spektras; Δr_n – $n-$to sluoksnio storis. Matome, kad

$$|G_{i+1}(f)| = |G_i(f)| \exp\{-2\alpha_{i+1}(f)\Delta r_{i+1}\}|K_{i+1}| \text{ (1), kur } K_{i+1} = (1 - R_i^2)R_{i+1}/R_{i,}$$

Lygties (1) abiejų dalių logaritmavimas leidžia gauti išraišką $\alpha_{i+1}(f)$,

$$\alpha_{i+1}(f) = \frac{1}{2\Delta r_{i+1}}\left[\ln\frac{|G_i(f)|}{|G_{i+1}(f)|} + \ln|K_{i+1}|\right], \text{(2) [24]}$$

Matuojant slopinimo koeficientą nehomogeninėje aplinkoje, pastovus narys $\ln|K_{i+1}|$ išraiškoje (2) turi būti rastas eksperimentiniu būdu, arba metodiškai eliminuotas. Kada slopinimo koeficiento priklausomybė nuo dažnio nežinoma, arba ją galima pateikti, kaip $\alpha(f) = \alpha_0 f^m$ su žinomu koeficientu m, narys $\ln|K_{i+1}|$ eliminuojamas paprastai. Diferencijuojant išraišką (2) pagal f, išvengiama būtinumo nustatyti pastoviąją dedamąją, o iš gautos išraiškos nustatoma slopinimo pastovioji α_0. Siūloma yra nustatyti pastovų narį išraiškoje (2) iš sąlygos, tada

$$\alpha_{i+1}(f) = \frac{1}{2\Delta r_{i+1}}\left(\ln\frac{|G_i(f)|}{|G_{i+1}(f)|} + \ln\frac{S_i}{S_{i+1}}\right), \text{ (3) kur } S_i = \left|\int_0^{\tau_{im}} g_i(t)dt\right|, \tau_{im} - \text{echosignalo } g_i(t) \text{ trukmė.}$$

Kaip žinoma, echoskopijoje naudojamų signalų vidutinis virpamasis dažnis lygus nuliui. Tai reiškia $S_i \approx S_{i+1} \approx 0$. Tačiau šiuo atveju, reikia įvertinti santykį S_i/S_{i+1}, kas atitinka neapibrėžtumo $0/0$ tyrimui. Aproksimuojant zonduojančių impulsų gaubtinę Gauso funkcija, galimas sekantis dydžio $\ln(S_i/S_{i+1})$ formulėje (3) nustatymo kelias. Įvertindami, tai kad $S_i/S_{i+1} = |G_i(0)|/|G_{i+1}(0)|$ ieškosime šio santykio ribos, kada $\omega \to 0$. Galima parodyti, kad

$$\frac{|G_{i+1}(\omega)|}{|G_i(\omega)|} = \frac{A_{i-1}}{A_i}\frac{\beta_i}{\beta_{i-1}}\exp\left\{\frac{\omega_i^2}{2\beta_i^2} - \frac{\omega_{i-1}^2}{2\beta_{i-1}^2}\right\}\frac{1 - e^{-k_{i-1}\omega}}{1 - e^{-ki\omega}},$$

$$\text{kur } k_i = \frac{2\omega_i}{\delta_i^2};\ R = \frac{A_i}{A_{i+1}}\frac{\delta_{i+1}}{\delta_i}\exp\left\{\frac{\omega_{i+1}^2}{2\delta_{i+1}^2} - \frac{\omega_i^2}{2\delta_i^2}\right\}; \text{ [24]}$$

A_i, ω_i, δ_i – echosignalų $g_i(t)$ parametrai, atitinkantys amplitudei, dažniui ir gaubtinės kritimo greičiui.

Antro daugiklio ribą prie $\omega \to 0$ randame, panaudoję Lopitalio taisyklę neapibrėžtumo $0/0$ tyrimui: $\lim_{\omega\to 0}\frac{1 - e^{-k_i\omega}}{1 - e^{-k_{i+1}\omega}} = \frac{k_i}{k_{i+1}}$. Tada, ieškoma pastovioji išraiškoje (3) nustatoma pagal formulę

$$\ln\frac{S_i}{S_{i+1}} = 2\pi^2\left(\frac{f_{i+1}^2}{\delta_{i+1}^2}\right) - \left(\frac{f_i^2}{\delta_i^2}\right) + 3\ln\frac{\delta_{i+1}}{\delta_i} + \ln\frac{A_i f_i}{A_{i+1} f_{i+1}}, \text{kur } f_i = \omega_i/2\pi.$$

Esant tiesinei slopinimo koeficiento dažninei priklausomybei, kada galima laikyti $\delta_i = \delta_{i+1} = \delta_0$,

turime $\ln\frac{S_i}{S_{i+1}}=\frac{2\pi^2}{\delta_0^2}\left(f_{i+1}^2-f_i^2\right)+\ln\frac{A_i f_i}{A_{i+1}f_{i+1}}$. (4) [24]

Nagrinėjamą aplinkos modelį papildžius, įvesdant tarp sluoksnių ribų išskaidytus atspindinčius elementus , difuziškai išsklaidančius ultragarsą. Toks papildymas padarys nagrinėjamą modelį pakankamai artimu realioms medžiagoms. Šiuo atveju, ryšys tarp echosignalų spektrų, gaunamų nuo dviejų nehomogeninio sluoksnio Δr gretimų ribų, gali būti užrašytas sekančiame pavidale $|G_{i+1}(f)|=|G_i(f)|\exp\{-2\Delta r\alpha_{i+1}(f)\}|K_{i+1}|f^{\beta(f.\Delta r)}$. Čia: $\beta(f,\Delta r)-$ parametras, priklausantis nuo zonduojančio impulso dažnio, išsklaidančių ultragarsą aplinkos elementų dydžio ir tiriamo sluoksnio storio Δr. Reikia paminėti , kad ribotame dažnių diapazone, kai kuriems egzistuojantiems aplinkose sklaidikliams, reikšmė $\beta(f,\Delta r)$ gali būti artima konstantai, tai yra $\beta(f,\Delta r)=\beta_0(\Delta r)$. Lygties (5) sprendimui atžvilgiu, ir nežinomų parametrų ir nustatymui, logaritmuojame abi išraiškos (5) dalis ir sudarydami dviejų lygčių sistemą pirmai ir antrai abiejų dalių išvestinėms, gauname:

$$\left.\begin{array}{l}\left[\ln\frac{|G_{i+1}(f)|}{|G_i(f)|}\right]'+2\Delta r\alpha'_{i+1}(f)=\beta_0(\Delta r)\frac{1}{f}\\ \left[\ln\frac{|G_{i+1}(f)|}{|G_i(f)|}\right]''+2\Delta r\alpha''_{i+1}=-\beta_0(\Delta r)\frac{1}{f^2}\end{array}\right\} \quad (6)\ [24]$$

Padalinus panariui sistemos (6) lygtis prie $(f\neq 0)$ ir atlikę reikiamus transformavimus, turime:

$$\left(f\left[\ln\frac{|G_i(f)|}{|G_{i+1}(f)|}\right]'\right)'=2\Delta r\left[f\alpha'_{i+1}(f)\right]' \quad (7)\ [24]$$

Integruodami abi lygties (7) puses turėsime galutinę išraišką:

$$\alpha_{i+1}(f)=\frac{1}{2\Delta r}\left[\ln\frac{|G_i(f)|}{|G_{i+1}(f)|}-\ln\frac{|G_i(f_n)|}{|G_{i+1}(f_n)|}\right]+\alpha_{i+1}(f_n)--f_n\ln\frac{f}{f_n}\left\{\frac{1}{2\Delta r}\left[\ln\frac{|G_i(f)|}{|G_{i+1}(f)|}\right]'_{f=f_n}-\alpha'_{i+1}(f_n)\right\}, \quad (8)$$

kur $f_n\neq 0$ – bet koks dažnis iš zonduojančio impulso dažnių juostos. Palyginsime formules (2) ir (8). Jei išraiškoje (2) nežinomą konstantą įvertinti pagal reikšmes $G_i(f),G_{i+1}(f)$ ir $\alpha(f)$, prie dažnio $f=f_n$, tai gausime, kad pirma eilutė formulėje (8) atitinka formulę (2) ir išreiškia ultragarso absorbcijos koeficiento priklausomybę nuo dažnio tiriamoje medžiagoje. Tada, antra formulės (8) eilutė charakterizuoja funkcijos $\alpha(f)$pokytį, priklausantį nuo ultragarso impulsų difuzinio išsklaidymo. Tokiu atveju, kai dažnis $f_n=f_0$, kur f_0 –zonduojančio impulso spektro

maksimumo dažnis, tai ultragarsiniams signalams, kurių juosta yra arti dažnio f_0, antra eilutė formulėje (8) turės mažą įtaką. Todėl, pakankamai siaurajuosčiams signalams, išsklaidančioje aplinkoje slopinimo koeficiento priklausomybės nuo dažnio nustatymui gali būti naudojama lygtis (2), tai yra siaurajuosčiams signalams išsklaidymo koeficiento priklausomybė nuo dažnio, praeinant per mažas kliūtis, yra nereikšminga.

Tokiu būdu, gauta išraiška leidžia eksperimentiškai įvertinti ultragarso išsklaidymo, sukeliamo mažais difuziniais junginiais, įtaką slopinimo koeficiento reikšmės priklausomybei nuo dažnio tiriamoje medžiagoje.

2..5..5 FVE reikalavimu formulavimas

Atsižvelgiant i ankščiau aptartus vaizdo formavimo ypatumus galime nustatyti defektoskopo reikalavimus. Gaunamo vaizdo skiriamoji geba: vienas vaizdo taškas (*angl. pixel*) turėtu atitikti ne didesnio negu 50 μm taško skersmens tiriamoje medžiagoje, spindulio fokusavimo gylį nustatysime pastovų z_{max} = 5 mm. Atsižvelgiant į tai, kad prietaisas bus skirtas sąlyginai nedidelio ploto skenavimui, tokio kaip galimo struktūros pažeidimo ar nuovargio vietos, skenavimo kampas γ bus 25^0. Reikalinga skiriamoji geba daugiausiai priklauso nuo naudojamo dažnio, atsižvelgiant į sudarytus reikalavimus įrangai bei 4lentelėje pateiktus ultragarso bangų greičius kompozitinėje medžiagoje galime nustatyti reikalingą ultragarso diapazono dažnį. Bangos ilgis $\lambda \leq 50 * 10^{-6}$ m, bangos sklidimo greitis v = 2972 m/s iš turimu duomenų apskaičiuojame, kad dažnis bus

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{2972}{50 * 10^{-6}} = 59\ MHz$$

Atstumas nuo objekto Z_0 = 5 cm, tuomet pasiskaičiuojame skenuojamo ploto išilgini metmenį L

$$L = \frac{2Z_0}{\mathrm{ctg}\,\gamma} = \frac{0{,}1}{2{,}144} = 4{,}66 * 10^{-2}\ m$$

3. FRONTALINIO VAIZDO ECHOSKOPO (FVE) KOMPOZITINĖSE MEDŽIAGOSE (DEFEKTOSKOPO) STRUKTŪRINĖ SCHEMA IR JOS ANALIZĖ

Keitiklis: pjezoelektrinis keitiklis, naudojamas akustinius virpesius pakeisti i elektrinį signalą, keitiklio išėjimo įtampa yra tiesiogiai proporcinga keitiklio paviršiniam įtempimui kas nusako paviršinių bangų amplitudę. Keitikliai yra didelės varžos prietaisas, dėl ko gauname silpnus signalus.

Pirminis stiprintuvas: Dėl mažos išėjimo įtampos, kelias nuo keitiklio iki pirminio stiprintuvo turi buti kuo mažesnis, dėl to pirminis stiprintuvas gali buti integruojamas i pati keitiklį. Paprastai tokio

stiprintuvo stiprinimas yra 40–60dB. Stiprinimas skaičiuojamas taip : $S=20\log(V / V_i)$ V_i yra įėjimo įtampa, o V yra išėjimo įtampa. Čia amplitudė sustiprinama nuo 100 iki 100 kartu

Juostinis filtras: skirtas nuslopinti pašalinius akustinius signalus kurie nepatenka į nagrinėjamo dažnio diapazoną.

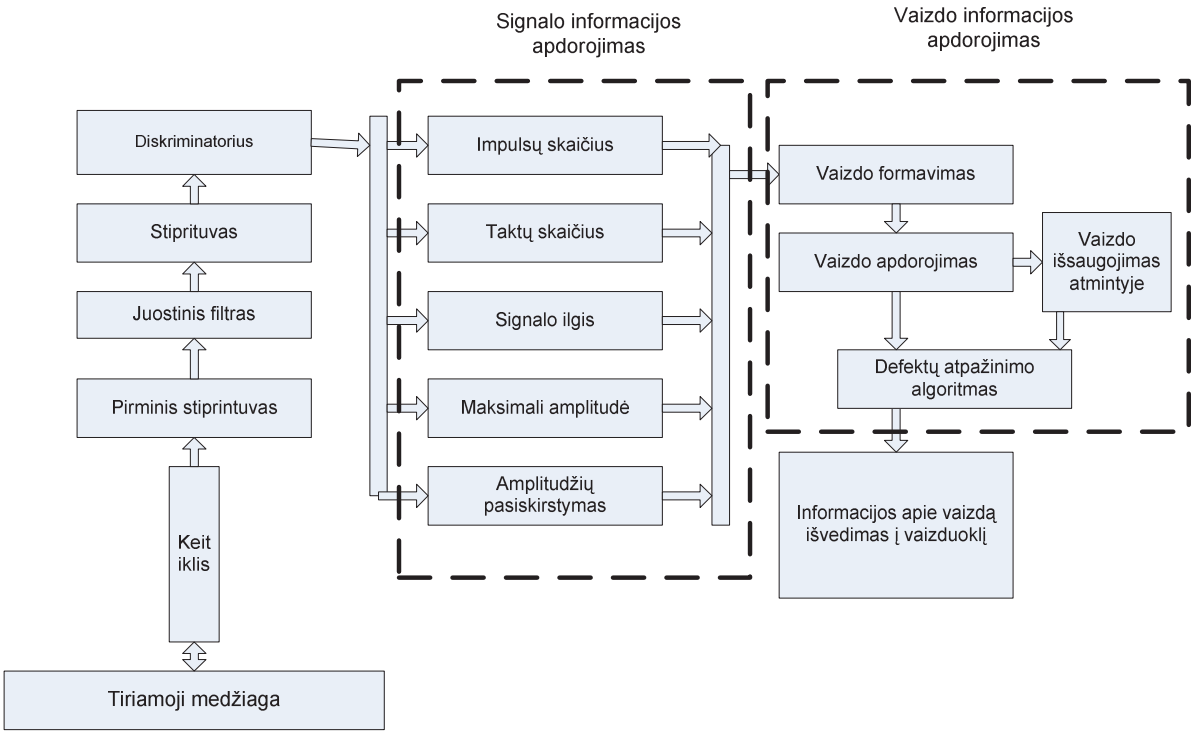
Stiprintuvas : dar karta sustiprina signalą su stiprinimo koeficientu nuo 20 iki 60dB

Diskriminatorius: Naudojamas priimamo signalo įtampos lygio apribojimui

Elektrinio signalo apdorojimo dalyje yra nustatoma informacija reikalinga akustinio vaizdo suformavimui. Suformavus akustinį vaizdą jis yra išskaidomas į matricą. Matricos elementų reikšmės atitinka atskirų vaizdo elementų šviesumo reikšmes.

Tokių būdu apdorojus vaizdą jis yra išsaugomas atmintyje kur yra išsaugoti ir ivairių kompozitinių struktūrų etaloniniai vaizdai.

Gautą apdorota vaizdą, pasinaudojant defekto nustatymo algoritmu, nustatomas defektas, jo pobūdis bei vieta. Visa informaciją yra išvedama į vaizduoklį.



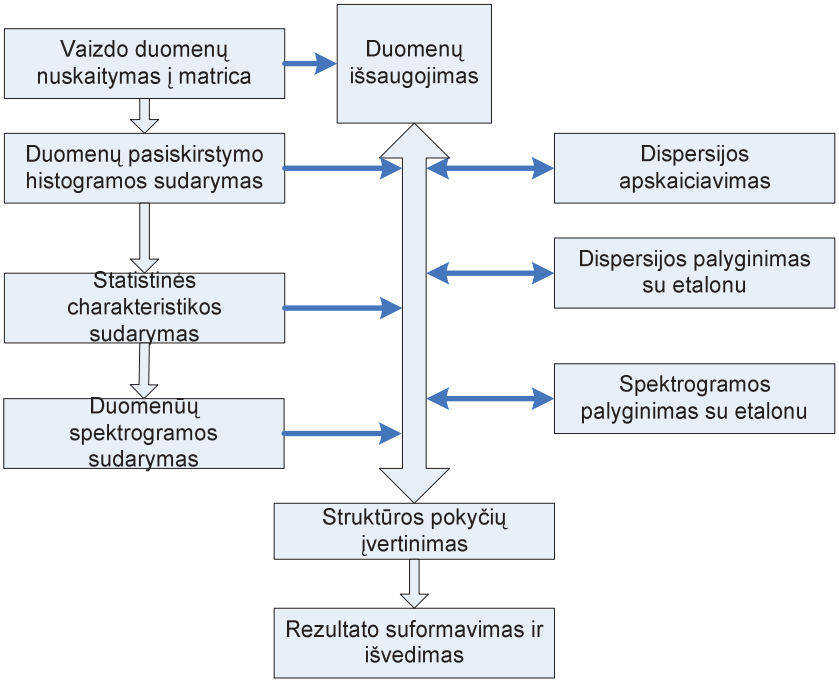
46 pav. Defektoskopo struktūrinė schema

3.1Defektų atpažinimo ir klasifikavimo algoritmų sukūrimas ir tyrimas

3.1.1 Vaizdo apdorojimo programos funkcinės schemos sudarymas

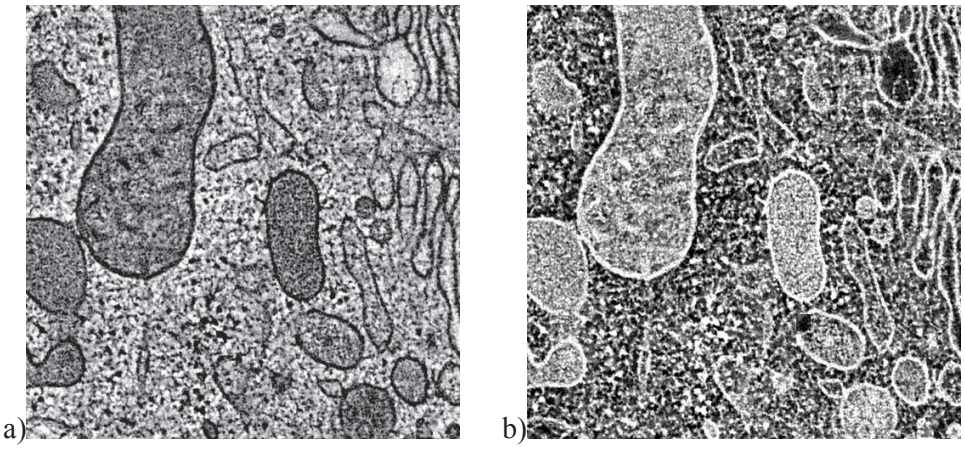
Sudarytas programos algoritmas skirtas atpažinti defekto susidarymą pirminėje jo atsiradimo stadijoje. Programa nuskaito iš atminties echoskopo sudarytą vaizdą kuri išsaugo kaip duomenų matricą. Matricos duomenys tai kiekvieno vaizdo taško ryškumo, ir jeigu vaizdas spalvotas tai

spalvos, informacija skaitmeniniu pavidalu. Toliau yra sudaroma duomenų pasiskirstymo histograma iš kurios galima matyti kaip duomenų reikšmės yra pasiskirsčiusios visame medžiagos paviršiuje. Sekančiame žingsnyje duomenys yra apdorojami statistiškai ir sudaroma jų pasiskirstymo diagrama. Visi tarpiniai duomenys yra saugomi atmintyje kur labai paprastai pasiekiami tiek programai tiek jos vartotojui. Tolimesniuose žingsniuose yra apskaičiuojama duomenų dispersija kuri vėliau palyginama su etaloninės struktūros duomenų dispersija, jau šiame žingsnyje galima pastebėti atsiradusius struktūroje pakitimus. Sudarius ir palyginus duomenų spektrogramas galima vaizdžiai pastebėti struktūros pokyti, o vėliau įvertinti to pokyčio matmenys ir vietą. Visus gautus vaizdo analizės rezultatus programa išveda į ekraną.



47 pav. Vaizdo apdorojimo programos funkcinė schem

3.1.2 Programos panaudojimas defekto atpažinimui



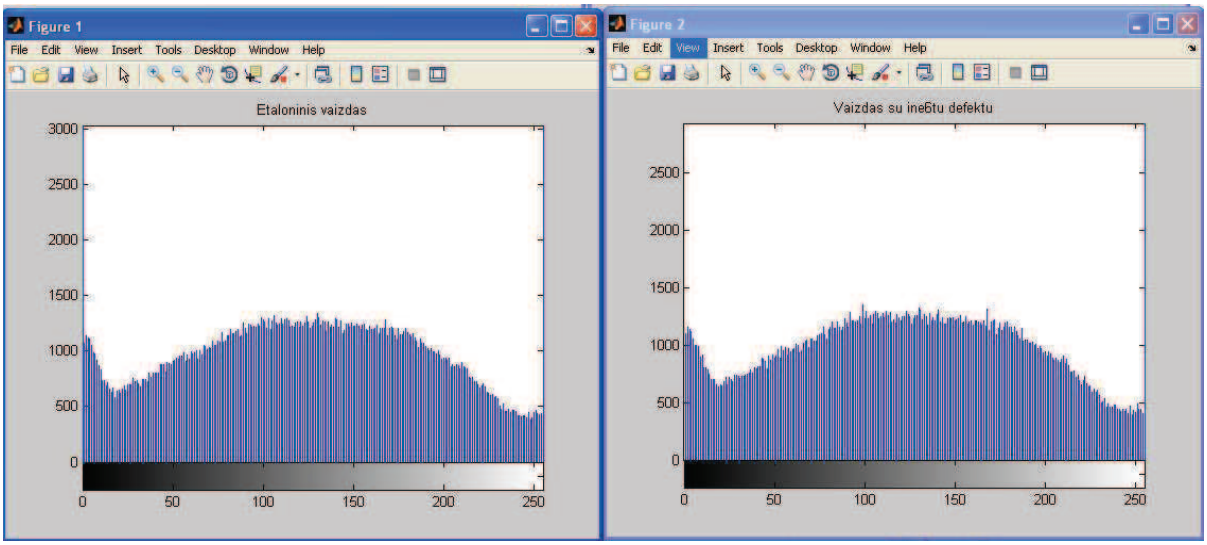
48 pav. Nagrinėjami echoskopiniai vaizdai: a) – etaloninis vaizdas ir b) – vaizdas su įterptu struktūros pokyčių

Pirmiausiai paskaičiuojame vaizdų vidutines skaisčio reikšmes, vidutinius kvadratinius nuokrypius, bei abejų vaizdų tarpusavio koreliaciją. Iš šių duomenų jau galima daryti pirmines išvadas apie struktūros pokyčius.

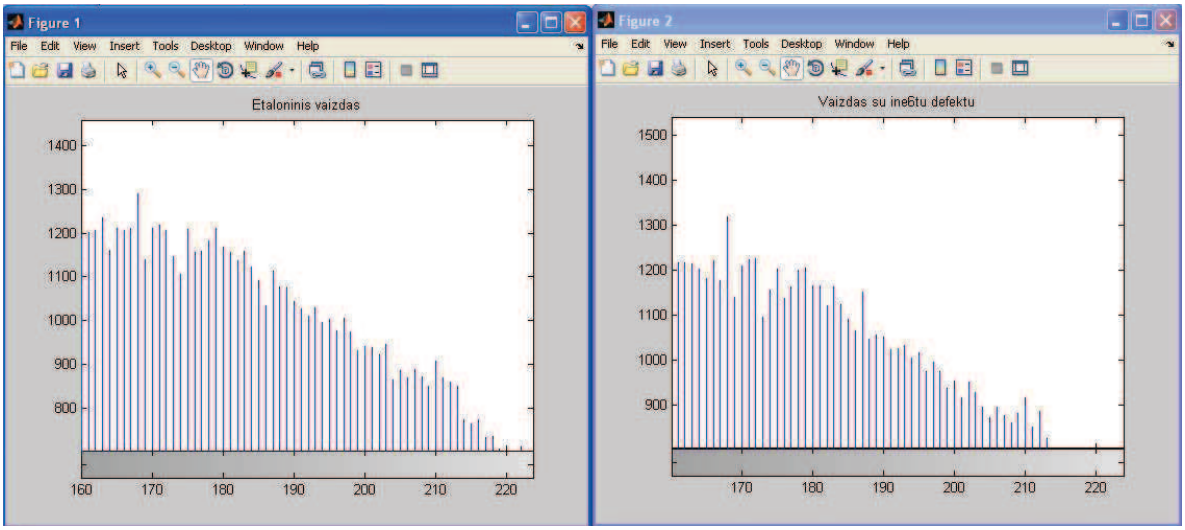
5 lentelė. Vaizdo duomenų pasiskirstymo reikšmės

	Vidutinė skaisčio reikšmė	Vidutinis kvadratinis nuokrypis	Koreliacijos koeficientas
Vaizdas a)	119,8511	69,1847	0,9983
Vaizdas b)	120,0553	69,0413	

Statistinės charakteristikos sudarymas

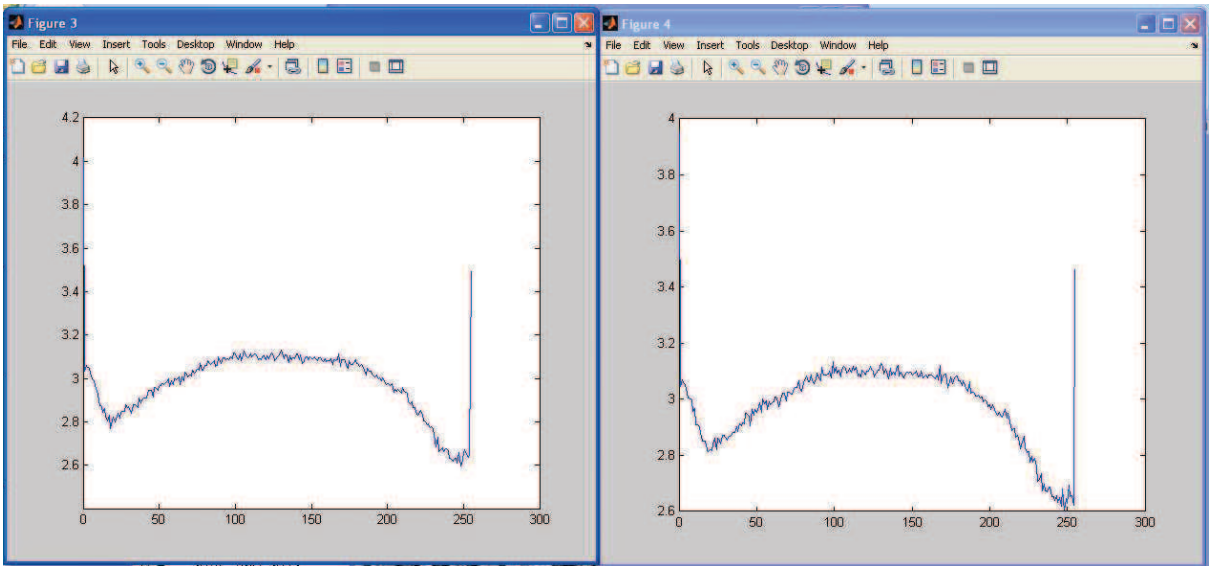


49 pav. Kompozitinių struktūrų su defektu (deš.) ir be defekto (kair.) statistinės charakteristikos



50 pav. Priartintos charakteristikos vaizdas

Iš gautu statistinių charakteristikų iš pirmo žvilgsnio sunku nustatyti ar yra skirtumas, kadangi tas skirtumas gan nežymus. Skirtumas pastebimas tik priartinus charakteristikas. Priartinus charakteristikos vaizdą galima pastebėti, kad skirtumas nors ir nežymus, bet yra.



51 pav. Kompozitinių struktūrų su defektu (deš.) ir be defekto (kair.) statistinės charakteristikos gaubtinės

REZULTATŲ APIBENDRINIMAS

Darbe apžvelgėme literatūroje aprašomas kompozitinių medžiagų struktūras, defektų atsiradimą ir jų atpažinimą akustinės neardomosios defektoskopijos metodais. Gaminant orlaivius, visuomet siekiama gauti kuo geresnį svorio ir kokybės santykį, dėl to, nors kompozitinės medžiagos pakankamai brangios, ekonomiškai naudinga jas naudoti. Kompozitinių medžiagų gamyboje reikalinga didelė kontrolė, kadangi atsiranda papildomų problemų dėl defektų atsiradimo, apie kuriuos kalbėta darbe, ir tiems defektams pastebėti yra naudojami akustines neardomosios kontrolės metodai.

Nagrinėjama darbe problema yra defekto atpažinimas jam esant tik pradinėje stadijoje. Išnagrinėjus echoskopinių vaizdų formavimui daromą įtaką ir defektų susidarymo atpažinimo galimybes, buvo pateiktas problemos sprendimas. Defektoskopinio vaizdo gavimui siūloma naudoti *C* būdo skenavimą. Sugalvotas kompozitinių medžiagų struktūros pokyčių atpažinimo algoritmas. Pasinaudojus *Matlab* programiniu paketu, parašyta echoskopinio vaizdo analizavimo programa. Šis programinis paketas buvo pasirinktas dėl didelės funkcijų bibliotekos, reikalingos vaizdo analizei, dėl šios priežasties programos kodas gautas ganėtinai trumpas. Programos vykdymo metu vaizdas išsaugomas kaip atskirų taškų skaisčio reikšmių matrica. Gauta matrica nagrinėjama statistiškai ir palyginama su atmintyje saugomu atitinkamos struktūros vaizdo etalonu. Rezultate gaunamos statistinės charakteristikos ir jų gaubtinės, bei informacija apie vidutinius skaisčio reikšmių nuokrypius ir tiriamo ir etaloninio vaizdo matricų koreliacijos koeficientus. Struktūros pokyčių vietos nustatymui panaudojamas etaloninio ir tiriamo vaizdo skaisčių matricų skirtumas, tokiu būdu gaunamas vaizdas tik su pokyčiu. Kai pustonio vaizdo formatas *unit8*, tai taško skaisčio reikšmė kinta nuo 0 iki 255. Struktūros pokytis yra identifikuojamas, kai skirtuminės matricos taško reikšmė viršija 35. Programos veikimas yra išbandytas su 3 skirtingais echoskopiniais vaizdais ir įterptas struktūros pokytis buvo nustatytas, dėl to galima sakyti, kad siūlomas iškeltos problemos sprendimo būdas yra tinkamas.

Ši sistema gali būti panaudota ne tik aviacinių, bet visų kompozitinių medžiagų tyrimams. Toliau tobulinant šią sistemą reiktų sudaryti pilną duomenų bazę su įvairaus tipo kompozitinėmis struktūromis, padaryti naudotojui patogią sąsają.

LITERATŪRA

1. Baker, A. *Composite Materials for Aircraft Structures*. 2004. 415 puslapis
2. Baker, A. *Composite Materials for Aircraft Structures*. 2004. 370 puslapis
3. Baker, A. *Composite Materials for Aircraft Structures*. 2004. 420 puslapis.
4. Burch S.F. *Comparison of SAFT and two dimensional deconvolution method// Ultrasonics*. 1987. Vol.25. No.4. P.259-266.
5. Boeing corp. *Non-destructive test. 737 NTD. Part 4. Ultrasonic*, Boeing , 1998, 15p
6. Boeing corp. http://www.boeing.com/commercial/787family/(žiūrėta 2010-01-12)
7. Домаркас В.Й., Пилецкас Э.Л. *Ультразвуковая эхоскопия*. – Л.: Машиностроение , 1988
8. Donald H. Middleton, *Composite materials in aircraft structures*. Longman Group UK 1990
9. Ермолов И. Н., Н. П. Алешин, А. И. Потапов *Неразрушающий Контроль*, Москва 1991г.
10. Summerscales J., *Compositedesight and manufacture* http://www.tech.plym.ac.uk/sme/MATS324/MATS324A4%20fracture.htm (žiūrėta 2010-01-12).
11. Кайно Г. *Акустические волны: Устройства визуализации и аналоговая обработка сигналов*. Пер. с англ. – М.: Мир , 1990.
12. Кайно Г. *Акустические волны: Устройства визуализации и аналоговая обработка сигналов*. Пер. с англ. – М.: Мир , 1990 – 656с.
13. Менделеева, Е. *Композиционные материалы*. http://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/himiya/KOMPOZITSIONNIE_MATERIALI.html (žiūrėta 2010-01-12).
14. NDT Systems, Inc. *Acoustical Properties Of Common Materials* http://www.ndtsystems.com/Reference/Velocity_Table/velocity_table.html
15. Olympus corporation. *Применение и теория НК* http://www.olympus-ims.com/ru/ndt-application/183-id.209715288.html(žiūrėta 2010-01-12).
16. Olympus corporation. *С-скан фазированными решётками* http://www.olympus-ims.com/ru/ndt-tutorials/instrumententation/pa-cscan/(žiūrėta 2010-01-12).
17. Olympus corporation. *panametrics-UT* http://www.olympus-ims.com/data/File/panametrics/ panametrics-UT.en.pdf 44 psl. (žiūrėta 2011-03-12).

18. Olympus corporation. http://www.olympus-ims.com/data/File/panametrics/panametrics-UT.en.pdf 45psl.
19. ООО "НТЦ "Анклав". *Акустический контроль* http://www.anklav.com/index.php?option=com_content&view=article&id=97&Itemid=131 (žiūrėta 2010-01-12)
20. Ozaki Y., Sumitani H., Tomoda T., Tanaka M. *Synthetic aperture real-time ultrasonic scroll-imaging system// Inter NDT conference*. London. 1989. P.2489-2497
21. Pileckas E. *Diagnostiniai UG požymiai*, medicininės technikos labolatorija.
22. Pileckas E. *The formation of frontal acoustic scenery in the echoscopy* .
23. Pileckas E.*Ultragarsinės neardančiosios kontrolės metodo apžvalga*. Straipsnis. VGTU AGAI
24. Pileckas E., Janavičius S. *Echo-impulsinis slopinimo parametrų nustatymas ultragarsinėje konstrukcijų defektoskopijoje*.
25. *Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий* справочник. - Кн. 2. Москва: Машиностроение, 1986
26. the American Society for Nondestructive Testing. *Thermography of Composites* http://www.asnt.org/publications/Materialseval/basics/jul07basics/jul07basics.htm (žiūrėta 2010-01-12).
27. The Aviation History On-Line Museum, *Composite Materials* http://www.aviation-history.com/theory/composite.htm(žiūrėta 2010-01-12).
28. Thomas A. Grandine. The Boeing Company. Seattle, *Surface Modeling for Composite Materials* http://www.ifi.uio.no/siag/problems/grandine/(žiūrėta 2010-01-12).
29. The University of Southern Mississippi. *Composites* http://pslc.ws/russian/composit.htm (žiūrėta 2010-01-12).
30. UAB "Compositus". *Kompozitinių medžiagų panaudojimas* http://www.compositus.lt/lt/galerija (žiūrėta 2010-01-12).
31. Ultrasonic testing. *Non-destructive testing handbook, second edition. Vol.7*. USA: American Society for Non-destructive Testing, 1991.
32. Ultrasonic testing. *Non-destructive testing handbook, second edition. Vol.7*. USA: American Society for Non-destructive Testing, 1991. 10 - 11 puslapis.
33. USA Department of defense. Handbook http://snebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-HDBK-17-5.pdf 94psl. (žiūrėta 2010-01-12).

34. USA Iowa State University. *Basic Principles of Ultrasonic Testing* http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Introduction/description.htm (žiūrėta 2010-01-12).
35. USA Iowa State University. http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/DataPres.htm (žiūrėta 2011-03-12).
36. Ylitalo Juha. *A fast ultrasonic synthetic aperture imaging method: application to NDT// Ultrasonics.*1996. Vol.34. No.4. P.331-333.
37. Vladišauskas, A. *Sintetinės apertūros fokusavimo technikos (SAFT) pjezokeitikliai*, KTU,Ultragarso mokslo centras. 1999.
38. Žiliukas A. *Orlaivių techninė diagnostika ir patikimumas*. Kaunas: Technologija,1998.
39. *Materiał kompozytowy* http://pl.wikipedia.org/wiki/Materiał_kompozytowy (žiūrėta 2010-01-12).

PRIEDAI

1 Priedas. Programos kodas

```
clear all
clc
p=imread('cell1.jpg');% etalonas
f=imread('cell2.jpg');% su įneštais pokyčiais
p2=rgb2gray(f);%pakeičiame vaizdą pustoniu
imtool (p)
imtool (p2)
%vaizdo duomenų vidutinė reikšmė
m=mean2 (p)
m2=mean2 (p2)
%vaizdo duomenų vidutinė kvadratinio nuokrypio reikšmė
d=std2(p)
d2=std2(p2)
%vaizdo domenų koreliacijos koeficientas
k=corr2(p,p2)
%histogramos sudarymas
figure (1)
title ('etaloninis vaizdas')
imhist(p)
figure (2)
title ('Įnešus papildoma tašką')
imhist(p2)
%histogramos gaubtines sudarymas
figure (3)
[h1,cx1]=imhist(p)
h1=log10(h1)
plot (cx1,h1);
figure (4)
[h2,cx2]=imhist(p2)
h2=log10(h2)
plot (cx2,h2);
```

2 Priedas. 14-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos pranešimo santrauka

Mokslinė konferencija

Aviacija' 2011
ir AVIACIJOS TECHNOLOGIJOS

Konfrencija **o r g a n i z u o j a m a** kartu su

LR karinėmis oro pajėgomis, Civilinės aviacijos administracija, VĮ „Oro navigacija"

M o k s l o k o m i t e t a s:

Prof. habil. dr. Jonas Stankūnas (pirmininkas)

Prof. habil. dr. Eugenijus Pileckas

Prof. habil. dr. Antanas Žiliukas

Doc. dr. Eduardas Lasauskas

Doc. dr. Algimantas Jakučionis

Doc. dr. Kazimieras Maceika

Darius Rudinskas (sekretorius)

O r g a n i z a c i n i s k o m i t e t a s:

Doc. dr. Eduardas Lasauskas (pirmininkas)

Fil. Margarita Apanavičienė (sekretorė)

14-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos

„Mokslas – Lietuvos ateitis" 2011 m. teminė konferencija

AVIACIJOS TECHNOLOGIJOS

2 sekcija: AVIONIKA

R. Čepulis
Visakrypčių radijo švyturių ir jų borto įrangos pakeitimo pažangesnėmis navigacijos sistemomis perspektyvų tyrimas .. x

A. Pačinskas

Elektroakustinių keitiklių, naudojamų ultragarsinėje kompozitinių medžiagų neardomojoje kontrolėje, kryptiškumo savybių tyrimas ……..... x

T. Masiulionis

Palydovinių navigacijos ir jas papildančių sistemų įrangos panaudojimo mokomiesiems skrydžiams tyrimas ……. x

J. Bersenev
Tūpimo pagal prietaisus sistemų panaudojimo mažuose Lietuvos oro uostuose tikslingumo tyrimas …….. x

D. Zataveckas, E. Pileckas
Orlaivio orinių greičių matavimo akustinių metodų pagrindu galimybių tyrimas ……. x

A. Vladimirov
Dažnių priskyrimo radionavigaciniams švyturiams problemos ir tyrimai ……. x

I. Suzdalev
Kylančio oro srauto matematinio aprašymo aspektai ……. x

V. Lapinskas
Sklandytuvo atakos ir slydimo kampo matavimų tyrimai ……. x

M. Gruzdis
Kompozitinių medžiagų defektų, aptinkamų akustinės neardomosios
kontrolės metodais, atpažinimo tyrimas ……. x

KOMPOZITINIŲ MEDŽIAGŲ DEFEKTŲ, APTINKAMŲ AKUSTINĖS NEARDOMOSIOS KONTROLĖS METODAIS, ATPAŽINIMO TYRIMAS

Miroslav Gruzdis
Aviacijos prietaisų katedra

Kompozitinių medžiagų tipai naudojami aviacijoje, bei defektų juose atsiradimo pobūdis. Akustinių neardomosios kontrolės metodų, kompozitinių konstrukcijų tyrimams, taikymo galimybės. Frontalinio echoskopinio vaizdo formavimas. Defektu atpažinimas ir jų klasifikavimas.

Reikšminiai žodžiai: Kompozitinės medžiagos, defektoskopija, defektų atpažynimas, akustiniai metodai, frontalinis echoskopas.