



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**GLARE kokybės neardomosios kontrolės, panaudojant
fazuotas ultragarsines gardeles, galimybių tyrimas**

Baigiamasis magistro studijų projektas

Romas Nainis
Projekto autorius

Prof. dr. Elena Jasiūnienė
Vadovė

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

GLARE kokybės neardomosios kontrolės, panaudojant fazuotas ultragarsines gardeles, galimybių tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas
Aeronautikos inžinerija (6211EX024)

Romas Nainis

Projekto autorius

Prof. dr. Elena Jasiūnienė

Vadovė

Doc. dr. Kristina Žukienė

Recenzentė

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Romas Nainis

GLARE kokybės neardomosios kontrolės, panaudojant fazuotas ultragarsines gardeles, galimybių tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Romo Nainio, baigiamasis projektas tema „GLARE kokybės neardomosios kontrolės, panaudojant fazuotas ultragarsines gardeles, galimybių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Studijų programa – Aeronautikos inžinerija 6211EX024

Magistrantūros studijų baigiamojo projekto užduotis

Studentui Romui Nainiui

1. Baigiamojo projekto tema:

“GLARE kokybės neardomosios kontrolės, panaudojant fazuotas ultragarsines gardeles, galimybių tyrimas”

2. Projekto tikslas:

Įvertinti fazuotų ultragarsinių gardelių galimybes atliekant stiklo pluoštu armuoto aliuminio kompozito (GLARE) neardomąją kontrolę.

3. Projekto uždaviniai:

1. atlikti informacijos šaltinių apžvalgą ir susipažinti su kompozituose galinčiais atsirasti defektais, jų ypatumais, bei kompozitų tyrimuose naudojamais NDT metodais, jų privalumais ir trūkumais. Parinkti tinkamiausią GLARE laminato patikros metodą;
2. sukurti GLARE laminato, su jame esančiais defektais, modelį pasirinkta programine įranga, bei atlikti ultragarso bangos sąveikos su defektais modeliavimą, siekiant parinkti tinkamiausią ultragarsinės patikros metodą;
3. ištirti ultragarsinio keitiklio darbo dažnio įtaką GLARE laminato patikros rezultatų kokybei;
4. ištirti akustinio signalo nuostolius jam sklindant per daugiasluoksnią ploną struktūrą ir joje esančius defektus;
5. modeliavimo metu parinktą metodą patikrinti eksperimentiškai, bei atlikti rezultatų analizę.

4. Projekto aprašomosios dalies struktūra:

Įvadas, GLARE sandara, laminatų defektai (tipai, susidarymo ypatumai), defektų aptikimo metodai (tipai, galimybės, privalumai ir trūkumai), aprašomosios dalies išvados.

5. Projekto konsultantai:

Nėra

Baigiamojo projekto autorius Romas Nainis

(vardas, pavardė, parašas, data)

Baigiamojo projekto vadovas Elena Jasiūnienė

(vardas, pavardė, parašas, data)

Krypties studijų programos vadovas Janina Jablonskytė

(vardas, pavardė, parašas, data)

Romas Nainis. "GLARE kokybės neardomosios kontrolės, panaudojant fazuotas ultragarsines gardeles, galimybių tyrimas". Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovė prof. dr. Elena Jasiūnienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): Aeronautikos inžinerija (E14), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: GLARE, laminatas, fazuota ultragarsinė gardelė, ultragarsas.

Kaunas, 2019. 70 psl.

Santrauka

Šio darbo tikslas yra įvertinti ultragarsinių fazuotų gardelių galimybes atliekant GLARE ir panašaus tipo laminatų neardomąją kontrolę defektų aptikimui. Tiriamajam darbui atlikti, reikalinga įvykdyti šias užduotis: atlikti informacijos šaltinių apžvalgą ir susipažinti su kompozituose galinčiais atsirasti defektais bei kompozitų tyrimuose naudojamais NDT metodais; atlikti pasirinktų NDT metodų modeliavimą su sukurtu GLARE modeliu; teorinį modelį patikrinti eksperimentiškai ir atlikti gautų rezultatų analizę.

Orlaivių detalės, pagamintos iš tokio tipo medžiagų vis plačiau naudojamos aviacijoje. Viena iš problemų, atliekant detalių eksploatacijos metu atsirandančių vidinių defektų inspektavimą, yra mobilios tam tikslui tinkamos įrangos pasirinkimas. Viena iš galimybių inspektavimui yra ultragarsinių fazuotų gardelių naudojimas. Darbo metu teoriškai įvertintos ir tarpusavyje palygintos fazuotų gardelių ir kitų keitiklių teorinės galimybės tirti GLARE tipo struktūrą ir nustatyta, kad tinkamiausias pasirinkimas inspektuoti defektus plonose daugiasluoksnėse struktūrose būtų 10 MHz imersinis keitiklis ir 5 MHz fazuota gardelė. Eksperimentinio patikrinimo metu atliktas GLARE bandinio tyrimas, atlikta gautų rezultatų analizė.

Nainis Romas. "Feasibility study of non-destructive testing of GLARE composite using ultrasonic phased arrays". Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Elena Jasiūnienė; Mechanical engineering and design faculty, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Aeronautical engineering (E14), Engineering Science

Keywords: GLARE, laminate, phased array probe, ultrasound.

Kaunas, 2019. 70 p.

Summary

The purpose of this work is to evaluate the possibilities of ultrasonic phased arrays for non-destructive control of defects in GLARE and similar laminates. To carry out the research work, it is necessary to perform the following tasks: review information sources and get acquainted with defects that may occur in composites and NDT methods used in composite material inspection; to model the selected NDT methods with the created GLARE structure; test the theoretical model experimentally and analyze the results obtained.

Aircraft parts made of this type of material are increasingly used in aviation. One of the problems with the inspection of internal defects arising during the operation of parts is the choice of suitable mobile equipment. One of the possibilities for inspection is the use of ultrasonic phased arrays. Theoretical possibilities of investigating the GLARE type structure using ultrasonic phased arrays and other transducers were evaluated and compared with each other, and it was determined that the best choice for inspection of defects in thin multilayered structures would be a 10 MHz immersion transducer and a 5 MHz phased array. The examination of the GLARE sample was carried out during the experimental testing and the analysis of the obtained results was performed.

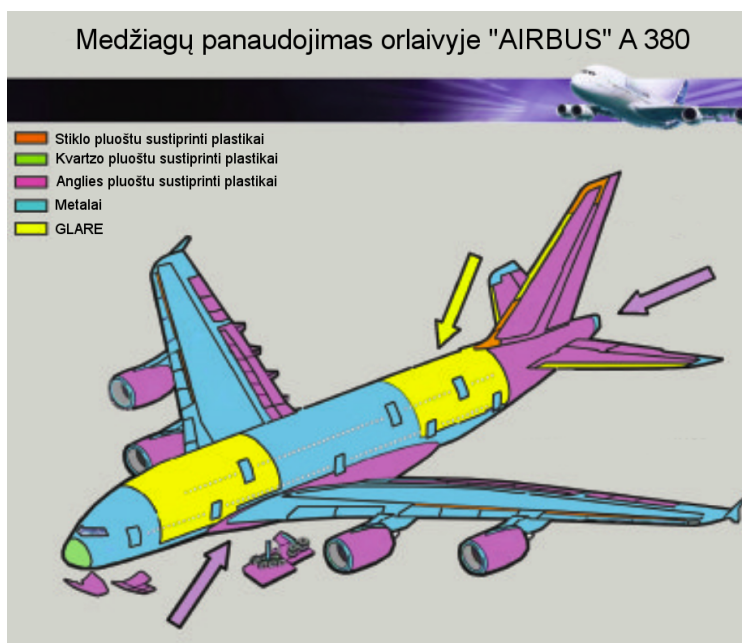
Turinys

Ivadas.....	9
1. GLARE sandara ir fizikiniai parametrai.....	11
2. Laminatų defektai.....	15
2.1. Gamybos metu susidarantys defektai	15
2.2. Eksploatacijos metu susidarantys defektai	16
3. GLARE defektų tyrimai	20
3.1. Jusliniai metodai	20
3.2. Vibraciniai metodai.....	20
3.3. Garso bangų sklidimu ir savybėmis paremti metodai	21
3.4. Jutiklių naudojimas	23
3.5. Apibendrinimas	24
4. Teorinis modeliavimas	25
4.1. Imersinio metodo su nefokusuojančiais keitikliais modeliavimas	26
4.1.1. Modeliavimo aprašymas ir keitiklių parametrai.....	26
4.1.2. Rezultatai.....	28
4.2. Imersinio metodo fokusuojančiais keitikliais, modeliavimas	32
4.2.1. Modeliavimo aprašymas ir keitiklių parametrai.....	32
4.2.2. Rezultatai.....	35
4.3. Tyrimo, naudojant fazuotas gardeles, modeliavimas	40
4.3.1. Modeliavimo aprašymas ir keitiklių parametrai.....	40
4.3.2. Rezultatai.....	42
4.4. Gautų rezultatų analizė	49
4.5. Tinkamiausio keitiklio pasirinkimas.....	53
5. Eksperimentiniai matavimai.....	59
5.1. Matavimas imersiniu keitikliu praėjimo metodu	59
5.2. Matavimas fazuotomis gardelėmis.....	61
5.3. Rezultatų apibendrinimas	66
Išvados.....	68
Informacijos šaltinių sąrašas.....	69

Įvadas

Šiuolaikinėse aviacijos ir kosmoso pramonėse jau kuris laikas vienas iš didžiausių galvos skausmų yra orlaivio masė ir variklių ekonomiškumas. Kuo mažesnis yra orlaivio masė, tuo mažiau kuro jis sunaudoja tam pačiam nuotoliui įveikti ar tokiam pat kroviniumi gabenti, arba gali toliau nuskristi su tuo pačiu kuro kiekiu. Kaip nesunku suprasti, šios aplinkybės įtakoja ir orlaivio eksploatacijos kaštus. Mažinant orlaivio masę, bei didinant variklių ekonomiškumą kaštai mažėja. Kompozitinės medžiagos orlaivių korpuso, sparnų konstrukcijose, o taip pat ir variklių konstrukcijose, jau naudojamos kelis dešimtmečius, tačiau nuolat yra kuriamos vis pranašesnės medžiagos, turinčios geresnes fizikines bei chemines savybes. To pasekoje šiandien aviacijos pramonėje naudojami kompozitai, lengvesni už tradicines medžiagas (pvz., aliuminį, plieną), bet savo fizikinėmis, mechaninėmis savybėmis jas lenkia.

Civilinėje aviacijoje iš esmės galimi du pasirinkimai, kaip naudojant kompozitines medžiagas, galima būtų mažinti orlaivio sudeginamo kuro kiekį. Vienas būdas yra mažinti orlaivio konstrukcijos bendrą masę, naudojant lengvesnes medžiagas, bet nesumažinant orlaivio konstrukcijos tarnavimo laiko, patvarumo, patikimumo ir kitų kritinių eksploatacinių savybių. 1 paveiksle pavaizduotas orlaivyje „Airbus A380“ panaudotų kompozitų pasiskirstymas. Kaip teigiama šaltinyje, naudojant kompozitus orlaivio masė sumažinta net 15000 kg. Šiame konkrečiame orlaivyje naudojama 20 skirtingų lydiniių [1].



1 pav. Kompozitų pasiskirstymas „Airbus A380“ konstrukcijoje [1]

Yra paskaičiuota, kad 1 kg sumažinus „A380“ masę, jo sudeginamo kuro kiekis per valandą sumažėja 50 ml. Gal tai ir neatrodytų daug, bet turint mintyje, kad tokio orlaivio tarnavimo laikas yra apie 75000 val., susidarytų apie 3750 l sutaupyto kuro. Jei visas tokiaame orlaivyje naudojamas plienines dalis pakeistų tokios pat dalys, pagamintos iš titano lydinio, orlaivio masė sumažėtų 5750 kg., kas sutaupytų net 288 l, kuro per 1 skrydžio valandą, arba 22 mln. l per visa orlaivio tarnavimo laiką [1].

Kitas būdas yra didinti kuro degimo temperatūrą variklyje naudojant keramikos kompozitus. Yra žinoma, kad padidinus variklio turbinos įėjimo temperatūrą iki 1500 °C, kuro sudegimo efektyvumas

padidėja 6 – 8 proc. Orlaivio „A380“ atveju toks efektyvumo padidėjimas sąlygotų net 588 mln. l kuro sutaupymą per visą orlaivio tarnavimo laiką. Tokiu būdu būtų sutaupomos ženklios pinigų sumos [1].

Naujos kompozitinės medžiagos, nors ir leidžia mažinti orlaivių eksploatacinius kaštus, tačiau iškyla kita problema – tokių medžiagų struktūra yra sudėtinga ir detalių pagamintų iš kompozitinių medžiagų, būklės įvertinimas, galimų gedimų, pažeidimų nustatymas yra komplikuoatas. Aviacijoje vis plačiau taikomi neardomosios kontrolės (toliau – NDT (angliškai – „*non destructive testing*“)) metodai, tokie, kaip ultragarso naudojimas. Homogenišku medžiagų analizė ultragarsu yra labai patogi dėl mobilios, bei nedidelių gabaritų įrangos. Tyrimai pateikia pakankamai tikslius rezultatus net neišmontavus tiriamo objekto, o jų atlikimui nereikalinga didelė patyrusių inžinierių komanda, užtenka vos 1 – 2 specialistų.

Kita situacija yra su kompozitinėmis medžiagomis, kuomet ne visuomet gaunama tinkamas tyrimo ultragarsu rezultatas, o ir gautų rezultatų analizė dažnai būna gana komplikuoata dėl daugelio atspindžių, stipraus pirminio signalo išsklaidymo ir slopinimo.

Taigi, šio darbo tikslas yra įvertinti fazuotų ultragarsinių gardelių galimybes atliekant stiklo pluoštu armuoto aliuminio kompozito (toliau – GLARE (angliškai – „*glass laminate aluminium reinforced epoxy*“)) neardomąją kontrolę.

Darbo tikslui pasiekti bus reikalinga įgyvendinti šias užduotis:

1. atlikti informacijos šaltinių apžvalgą ir susipažinti su kompozituose galinčiais atsirasti defektais, jų ypatumais, bei kompozitų tyrimuose naudojamais NDT metodais, jų privalumais ir trūkumais. Parinkti tinkamiausią GLARE laminato patikros metodą;
2. sukurti GLARE laminato, su jame esančiais defektais, modelį pasirinkta programine įranga, bei atlikti ultragarso bangos sąveikos su defektais modeliavimą, siekiant parinkti tinkamiausią ultragarsinės patikros metodą;
3. ištirti ultragarsinio keitiklio darbo dažnio įtaką GLARE laminato patikros rezultatų kokybei;
4. ištirti akustinio signalo nuostolius jam sklindant per daugiasluoksnę ploną struktūrą ir joje esančius defektus;
5. modeliavimo metu parinktą metodą patikrinti eksperimentiškai, bei atlikti rezultatų analizę.

1. GLARE sandara ir fizikiniai parametrai

Sintetinių pluoštų ir metalų laminatai – tai hibridinės medžiagos, susidedančios iš metalo (aliuminio, plieno, titano ir kt.) lakštų ir kompozitinių medžiagų (armuojančių stiklo, anglies ir kt. pluoštų bei sintetinių epoksidinių dervų matricos) lakštų tarp jų. Aviacijoje GLARE yra vienas iš labiausiai žinomų tokių metalų laminatų. Jis sudarytas iš aliuminio lakštų ir tarp jų esančių armuojančio stiklo pluošto, impregnuoto epoksidinėmis dervomis (matrica) lakštų. Aliuminio lakštų storis bei skaičius gali svyruoti tiek į mažesnę, tiek ir į didesnę pusę, priklausomai nuo norimų gauti laminato savybių [2, 3]. GLARE pagal savo vidinę struktūrą ir fizikinius parametrus skirstomas į 6 atskiras klases [2]. Visų klasių GLARE lakštai tarp metalo yra pagaminti iš įvairiakryčio S tipo stiklo pluošto impregnuoto FM 94 matrica [2]. Stiklo pluošto lakštai aliuminio lakštų atžvilgiu gali būti orientuoti įvairiomis kryptimis. 1 lentelėje parodyta kurioje GLARE klasėje kaip yra orientuotas stiklo pluošto lakšto sluoksnis, bei įvardinti kiekvienos klasės didžiausi privalumai, lyginant su kitomis [2]. GLARE tiksliam įvardinimui yra naudojama kodavimo sistema. Pvz., GLARE 2A-3/2-0,4, reiškia, kad šiame metalo laminatare stiklo pluoštas yra orientuotas pagal lentelėje nurodytus parametrus 2A poklasiui, kompozite yra panaudoti 3 aliuminio ir 2 stiklo pluošto lakštai, kiekvienas stiklo pluošto lakštas sudarytas iš 2 stiklo pluošto sluoksnių matricoje, aliuminio lakštų storis 0,4 mm [2].

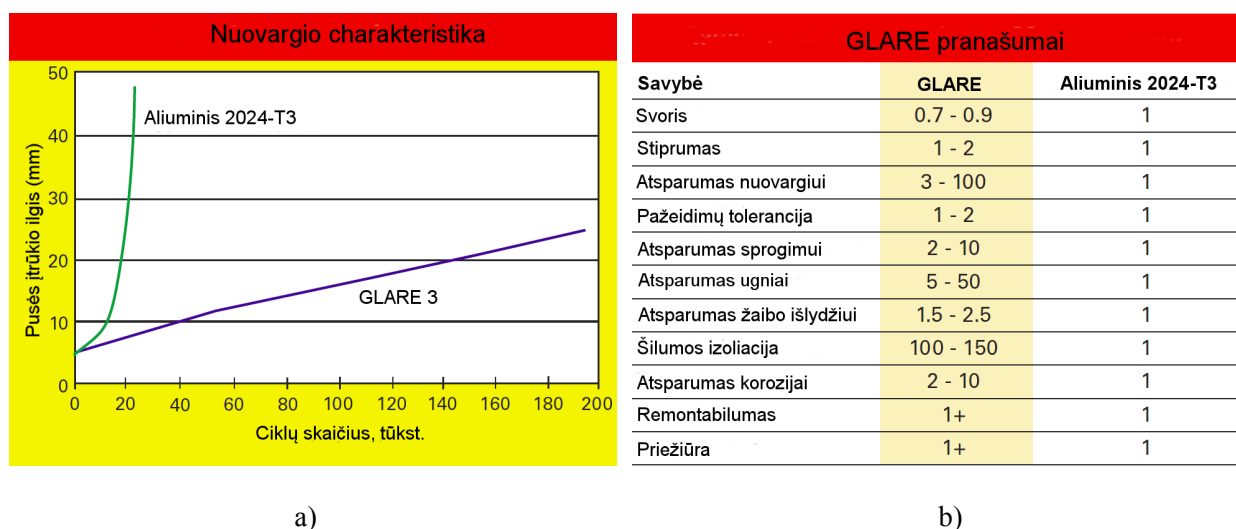
1 lentelė. GLARE suskirstymas klasėmis [2]

GLARE klasė	GLARE poklasis	Metalo lydinio sluoksnio storis ir tipas	"Pre - preg" orientacija	Pagr. privalumai
GLARE 1	-	0,3-0,4 7575-T761	0/0	Atsparumas nuovargiui, stiprumas, takumo riba
GLARE 2	GLARE 2A	0,2-0,5 2024-T3	0/0	Atsparumas nuovargiui, stiprumas
	GLARE 2B	0,2-0,5 2024-T3	90/90	Atsparumas nuovargiui, stiprumas
GLARE 3	-	0,2-0,5 2024-T3	0/90	Atsparumas nuovargiui, smūgiams
GLARE 4	GLARE 4A	0,2-0,5 2024-T3	0/90/0	Atsparumas nuovargiui, stiprumas 0 laipsn. kryptimi
	GLARE 4B	0,2-0,5 2024-T3	90/0/90	Atsparumas nuovargiui, stiprumas 90 laipsn. kryptimi
GLARE 5	-	0,2-0,5 2024-T3	0/90/90/0	Atsparumas smūgiams
GLARE 6	GLARE 6A	0,2-0,5 2024-T3	+45/-45	Atsparumas šlyčiai
	GLARE 6B	0,2-0,5 2024-T3	+45/-45	Atsparumas šlyčiai

GLARE turi metalo lydinio ir kompozitinių medžiagų savybių bei privalumų, tokių, kaip didesnis atsparumas smūgiams, didesnis tvirtumas ir pakantumas žalos padarymui, lyginant su kompozitinėmis medžiagomis. Didesnis atsparumas nuovargiui, mažesnis svoris, bei lengvesnis apdirbimas lyginant su gryno aliuminio lakštais. Laminato sandara sukuria barjerą išorinės drėgmės prasiskverbimui, todėl šio tipo medžiagos turi padidintą atsparumą korozijai [3]. GLARE pasižymi dideliu atsparumu ugniai, bei žaibo išlydžiams [3].

Didieji orlaivių korpusų ir jų dalių gamintojai (pvz., „Airbus“, „Boeing“ ir kt.) naudoja GLARE orlaivių fiuzeliažo panelių, stabilizatorių priekinių segmentų, grindų panelių, priešgaisrinių sienelių gamybai [4].

3 paveiksle pateiktas apytikslis GLARE ir 2024-T3 aliuminio mechaninių savybių palyginimas [3].



3 pav. GLARE ir 2024-T3 aliuminio palyginimas. a) – įtrūkių plitimo greitis, b) – mechaninės savybės [3]

Nepaisant visų privalumų GLARE gamybos ir eksploatacijos metu gali atsirasti įvairių tipų defektai ir medžiagos netolygumai, kurie yra būdingi tiek ir metalams, tiek ir kompozitinėms medžiagoms [4].

Gamybos procese taip pat kaip ir eksploatacijos metu atsiranda įvairaus tipo defektų, kurie blogina mechanines galutinio gaminio savybes. Tad labai svarbi kiekvieno gamybos proceso etapo analizė ir supratimas kokios priežastys įtakoja vienokių ar kitokių defektų atsiradimą metalo ir kompozito laminatė ir kaip būtų galima valdyti defektų susidarymą ir jų evoliuciją [4].

GLARE gamyba yra pakankamai sudėtinga ir dėl to gana brangi, nes reikalauja nemažai rankų darbo. Tiesa, tokių metalų laminatų gamybą stengiamasi vis labiau automatizuoti, bet susiduriama su naujais iššūkiais, apie kuriuos trumpai bus užsiminta vėliau [5].

Gamybos procese visas laminatas klijuojamas sluoksniu po sluoksniu. Labai svarbus yra tinkamas aliuminio lakštų paviršiaus paruošimas, kadangi tai apsprendžia sukibimo tarp skirtingų metalo ir armuojančių sluoksnių kokybę. Aliuminio paviršiaus paruošimo procesas susideda iš 7 etapų:

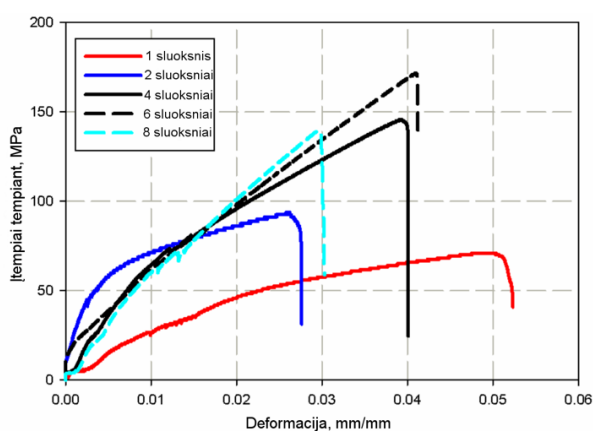
1. Aliuminio lakštai pamerkami į metiletiketono tirpalą riebalų nuo paviršiaus pašalinimui;
2. Po valymo atliekamas vandens testas valymo kokybės patikrinimui;
3. Atliekamas paviršiaus pašiuurkštinimas, naudojant popierių padengtą aliuminio oksido dalelėmis;
4. Lakštai 10 min. panardinami į 5% NaOH kambario temperatūros tirpalą ėsdinimui;
5. Lakštai nuplaunami karštu vandeniu ir 12 min. panardinami chromo rūgštyje;
6. Lakštai 60 s panardinami verdančiame vandenyje, kad paviršiuje susidarytų porėta aliuminio oksidhidroksido (AlOOH) plėvelė;
7. Galiausiai lakštai padengiami sukibimą skatinančiu aktyvatoriumi γ – glicidoksi-propiltrimetoksisilanu (γ -GPS). Aktyvatorius didina sukibimo tarp kompozito sluoksnių stiprumą ir ilgaamžiškumą [4].

GLARE gamybos proceso metu galinčius atsirasti defektų inspektavimui galima naudoti įvairius neardomosios kontrolės metodus, kurie leidžia sumažinti galutinę gaminio savikainą, techninio aptarnavimo laiką ir pan. Tačiau neardomosios kontrolės metodų naudojimas GLARE atveju yra

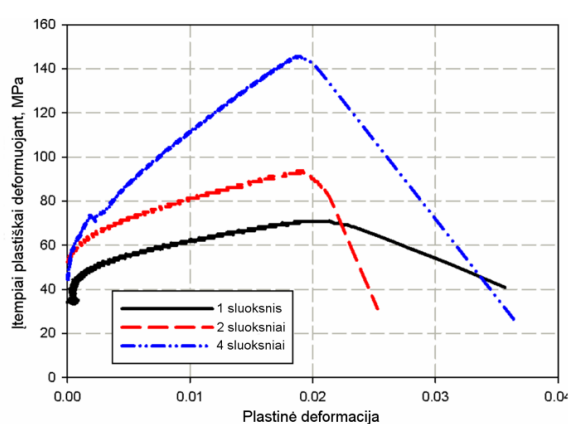
nemažas iššūkis dėl šios medžiagos stipriai išreikštos anizotropinės struktūros bei skirtingų sudarančių sluoksnių savybių [2].

4 – 6 paveiksluose pateikti 1, 2, 4, 6 ir 8 sluoksnių GLARE mechaninių savybių tyrimo rezultatai. Pirmas ir paskutinis struktūros sluoksniai yra aliuminio lakštai. Bandiniai veikti 200 KN jėga [5].

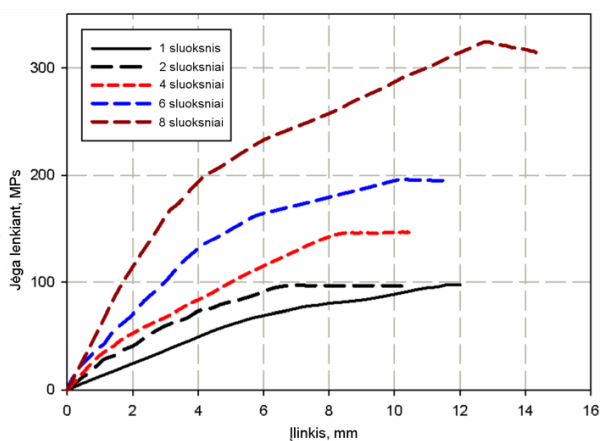
Pateiktoje bandinių deformacijų priklausomybėje nuo įtempių, atsirandančių bandinius tempiant aiškiai matoma, kad didinant stiklo pluošto sluoksnių skaičių laminatė, jis tampa atsparesnis tempimui. Išimtis yra tik su 8 sluoksnių bandiniu. Storesnio bandinio atsparumo tempimui sumažėjimas galėtų būti aiškinamas dėl delaminacijų atsiradimo. Delaminacijos atsiranda būtent aliuminio lakšto ir stiklo pluošto sluoksnio sukibimo plokštumoje. Kuo daugiau sluoksniu turi bandinys, tuo sukibimas tarp sluoksnių yra silpnesnis, tad išauga ir delaminacijų atsiradimo tikimybė [5].



4 pav. GLARE tempimo bandymo rezultatai [5]



5 pav. GLARE plastiškumo bandymo rezultatai [5]



6 pav. GLARE atsparumo lenkimui bandymo rezultatai [5]

GLARE taip pat stebimos plastiškumo savybės. Iš esmės kompozitas yra plastiškas dėl struktūroje esančių aliuminio sluoksnių. Kompozito plastiškumas mažėja didėjant armuojančių sluoksnių skaičiui, o esant 6 ir daugiau sluoksnių kompozitas praktiškai praranda plastiškumą. Tas gali būti aiškinama padidėjusiu stiklo pluošto kiekiu kompozite ir ryšių tarp kompozito sluoksnių tvirtumu [5].

Lenkimo trijuose taškuose testo metu nustatytas medžiagos standumas ir apskaičiuotas Jungo modulis. Pagal sekančiame paveiksle pateiktus testo rezultatus matyti, kad didėjant stiklo pluošto sluoksnių skaičių laminatė, jo standumas ir atsparumas lenkimui didėja. Taip pat didėja ir Jungo modulio vertė. Laminato atsparumas lenkimui yra didesnis nei atsparumas tempimui. Paveikus bandinius didžiausia jėga, jie nelūžo pusiau, o kompozito sluoksniai liko tarpusavyje tvirtai surišti [5].

2. Laminatų defektai

Kompozitinių medžiagų struktūra yra sudėtinga, todėl GLARE, o taip pat ir kituose tokio tipo laminatuose tiek gamybos tiek ir eksploatacijos metu gali susidaryti įvairių tipų defektai. Galinčių atsirasti defektų spektras yra gana platus, o defektų susidarymo priežastys taip pat labai įvairios.

2.1. Gamybos metu susidarantys defektai

Matricos porėtumas

Tai bene dažniausiai pasitaikantis defektas kompozite. Gamybos procese dėl matricai gaminti naudojamų lakių dervos sudedamųjų dalių gali susidaryti oro burbuliukai ar kitos tuštumos. Oro burbuliukai gali susidaryti kompozitui stiklėjant netinkamomis sąlygomis (netinkama temperatūra, laikas ir pan.) arba netinkamai vakuuojant ir pan. [6, 7].

Į gaminamą kompozitą patekusios pašalinės medžiagos

Tai gali nutikti dėl įvairių priežasčių, tokių kaip gamybos įrangos netinkama priežiūra, gamybai naudojamų kompozito ingredientų nepakankamas grynumas, įrangos gedimai ir pan. [6].

Netinkamas armuojančio pluošto kiekis matricoje

Tam tikras armuojančio pluošto frakcijos nukrypimas nuo normos yra galimas, bet viršijus tas ribas gautas kompozitas jau neatitiks jam keliamų techninių reikalavimų ir numatytų mechaninių ir fizikinių savybių [8].

Suklijavimo defektai

Matrica ir armuojantis pluoštas į vientisą kompozitą paprastai susijungia susiklijuojami. Tad šio proceso metu suklijavimo riboje gali atsirasti defektai dėl netinkamų stiklėjimo sąlygų ar klijuojamų paviršių užterštumo ir pan. [7].

Armuojančio pluošto netinkamas išsidėstymas matricoje

Dėl šio defekto gali suprastėti gaminio eksploatacinės savybės [8].

Nekokybiški medžiagos sluoksniai

Kelių sluoksnių pluoštu armuotų kompozitų (laminatų) gamybos proceso metu gali atsirasti netinkamai ar nevienodai orientuotų, suformuotų sluoksnių. Tokie defektai įtakoja kompozito standumą ir stiprumą. Taip pat atsiranda rizika, kad kompozitas gali imti deformotis galutinio stiklėjimo metu [6].

Nekokybiška matrica

Dėl netinkamo gamybos proceso ar netinkamai parinktų medžiagų kompozito matrica gali tinkamai nesusiformuoti [6].

Susibangavęs pluoštas

Defektas atsiranda, kai pluošto gijos, esančios toje pačioje plokštumoje, susisuka, susipainioja tarpusavyje. Šis defektas gali smarkiai įtakoti kompozito stiprumą [8].

Kompozito (laminato) sluoksnių trūkinėjimas

Šis defektas atsiranda dėl nevienodo skirtingų sluoksnių terminio traukimosi kompozito džiūvimo, stiklėjimo metu [6].

Delaminacijos

Tai retai pasitaikantis defektas kompozito gamybos proceso metu, tačiau gali atsirasti dėl užteršimo formuojant kompozito sluoksnius arba atliekant galutinį kompozitinės detalės apdirbimą [6].

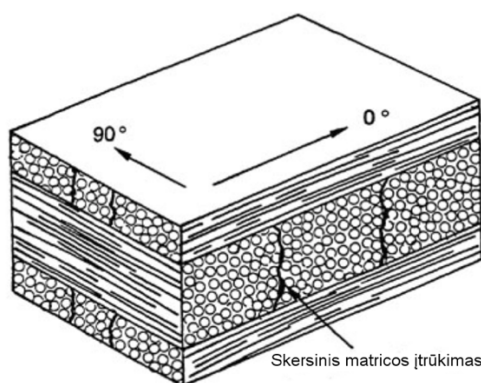
Armuojančio pluošto pažeidimai

Šie defektai esmingai mažina kompozito stiprumą. Be to, pluošto pažeidimų vietos dažnai tampa kitų pažeidimų židiniais ir sudaro sąlygas pažeidimų masto didėjimui. Dėl šių priežasčių kompozitą armuojančio pluošto kokybę galima būtų laikyti viena iš svarbiausių kompozito savybių [8].

2.2. Eksploatacijos metu susidarantys defektai

Matricos įtrūkimai

Tai defektai atsirandantys tarp dviejų ar daugiau kompozitinės medžiagos sluoksnių, kurie yra lygiagretūs armuojančiam pluoštui ir tų įtrūkimų gylis tęsiasi per visą sluoksnių storį. Tokie defektai gali įtakoti (arba ne) ir kitus struktūros pažeidimus, priklausomai nuo apkrovų dydžio, smūgių ar įtempių atsirandančių dėl temperatūrinių režimų. Matricos įtrūkimai pats savaime paprastai nepažeidžia visos struktūros vientisumo. Vis gi, šis defektas gali būti priežastimi kitiems dar didesniems defektams atsirasti, tad yra būtina į tai kreipti dėmesį. Laminatų gamybos etape matricos įtrūkiai nėra vertinami [9, 10].



7 pav. Laminato matricos trūkių schematinis vaizdas [11]

Armuojančio pluošto įtrūkimai

Reikėtų manyti, kad armuojančio pluošto defektai sumažina laminato standumą ir atsparumą, tačiau tyrimais (Craven'as, Pindoria, ir Olsson'as, 2009 m. [9]) buvo nustatyta, kad šio tipo defektai labiau įtakoja laminato atsparumą lenkimui, ir beveik nesumažina standumo. Taip pat tyrimo rezultatai parodė, kad pluošto įtrūkimai turi didesnę įtaką medžiagos atsparumui, nei standumui. Bet kokiu atveju, atsiradus šio tipo pažeidimams medžiagoje ir juo pastebėjus, reikėtų kaip galima greičiau išsiaiškinti kokias apkrovas dar gali atlaikyti taip pažeista struktūra [9].

Atsiklijavimas

Šis defektas paprastai atsiranda struktūros vietose, kur susidaro dideli įtempiai tarp dviejų priešingų paviršių. Tie dideli įtempiai dažnai būna susiję su esančiais įtrūkimais toje medžiagos srityje. Esant sumažėjusiam tarp sluoksniams sukibimui, tokią struktūrą paveikus išoriniu smūgiu, didelė dalis armuojančio pluošto gali atitrūkti. Atsiklijavimas gali atsirasti ne tik dėl esančių trūkių, bet ir dėl terminių apkrovų, senėjimo, nestiprių nuolat veikiančių smūgių, aplinkos poveikio, gamybos ar projektavimo broko ir kt. [10].

Atsiklijavimas nėra pagrindinė priežastis dėl kurios galėtų įvykti struktūros visiškasis sugadinimas. Atsiklijavimas įtakoja medžiagos stiprumą tik srityje apie atsiklijavimą ir aplinkines stiklo pluošto gijas [10].

Delaminacija

Delaminacijos pluošto kompozituose paprastai atsiranda dėl susidūrimų su išoriniais objektais. Delaminacijos yra vieni iš esminių ir lemtingų pažeidimų kompozituose, kadangi laminato stiprumas yra atvirkščiai proporcingas delaminacijoms. Delaminacija gali prasidėti nuo nedidelio įtrūkimo. Delaminacijos procesui intensyvėjant, sąryšis tarp metalo ir armuojančių sluoksnių mažėja. Tad yra labai svarbu pastebėti ir suprasti ar delaminacijos procesas prasidėjo [9].

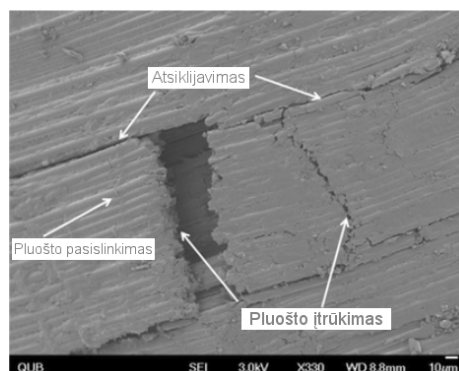


8 pav. Laminato delaminacija [12]

Reikia pastebėti, kad kol kas tyrėjai nesutaria dėl padidėjusios temperatūros įtakos pradinio įtrūkio didėjimui. Nustačius šiuos dėsningumus, būtų lengviau įvertinti naudingą likusį laminato struktūros amžių [10].

Armuojančio pluošto pasislinkimas

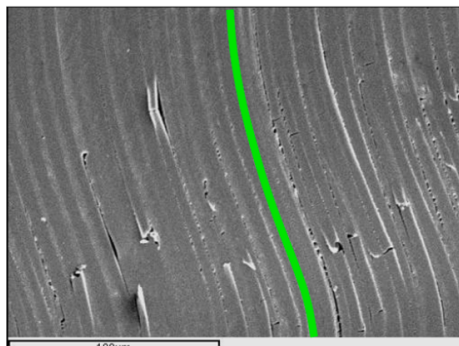
Armuojantis pluoštas iš savo vietos pasislenka pagrinde dėl silpno jo suklijavimo su matrica [10].



9 pav. Laminato atsiklijavimo, armuojančio pluošto pasislinkimo ir trūkio defektų vaizdas medžiagoje [13]

Armuojančio pluošto sulinkimas

Šis defektas mažina laminatų atsparumą gniuždymui, kadangi įtakoja mechanines laminato matricos savybes. Dėl armuojančio pluošto sulinkimo atsiranda vietinis struktūros pažeidimas ir matricos trūkis [9].



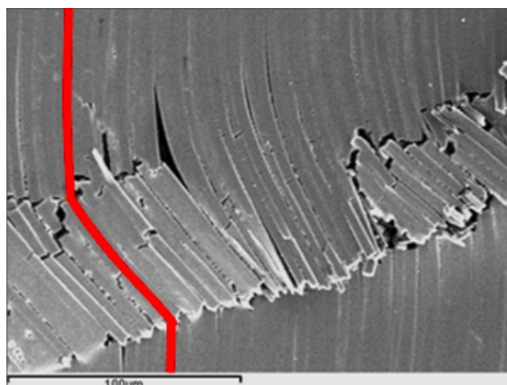
10 pav. Laminato armuojančio pluošto sulinkimas [14]

Berbinau, Soutis'as ir Guz'as (1999 m.) savo tyrimuose nustatė, kad šis armuojančio pluošto pažeidimas prasideda toje laminato pusėje kurioje veikiant išorine jėga, susidaro didžiausias laminato išlinkimas [10].

Armuojančio pluošto staigūs pasikreipimai

Šio tipo defektas sukuria armuojančio pluošto sritį, kurios orientacija smarkiai pakinta, lyginant su pradine pluošto orientacija laminatė. Defektas atsiranda kai dalis armuojančio pluošto pasislenka iš savo vietos arba dėl aukščiau paminėto armuojančio pluošto sulinkimo. Defektas atsiranda dėl gniuždymo jėgų veikimo. Nepaisant atliktų tyrimų ir aiškinantis kaip šie defektai atsiranda, nebuvo paprasta įvertinti juos vienakryptės struktūros kompozituose [10].

Yra nustatyta, kad padidėjus gniuždymo jėgoms gali atsirasti dalies armuojančio pluošto gijų pažeidimai kompozite. Tokios būklės kompozitą paveikus skersiniu judesiu šalia pažeisto armuojančio pluošto gali susidaryti sveikų pluošto gijų staigus pasikreipimo linijos. Šių linijų susidarymas drastiškai mažina laminato stiprumą ir nulemia jo sugadinimą. Šios aplinkybės buvo nagrinėjamos eksperimentiniais ir analitiniais metodais. Buvo patvirtinta, kad staigus pasikreipimo linijų dydis turi ženklų įtaką tų linijų plitimui [9].



11. pav. Laminato armuojančio pluošto staigus pasikreipimo linija [14]

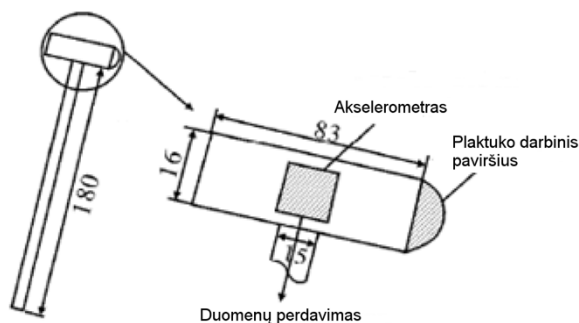
Pimenta'os, Gutkin'o, Pinho'o ir Robinson'o (2009 m.) atlikti tyrimai parodė, kad pasikreipimo linijų formavimasis yra susijęs su kompozito matricos susilpnėjimu. Tokio susilpnėjimo vietoje armuojančio pluošto gijos pažeidžiamos pirmiausia [10].

3. GLARE defektų tyrimai

GLARE gaminių kokybei įvertinti naudojami įvairūs NDT metodai. Sukurtų ir naudojamų metodų gausa leidžia daryti prielaidą, kad tokių struktūrų neardomieji tyrimai yra komplikuoti. Galimos kelios to priežastys: kompozitų vidinė struktūra ir struktūriniai matmenys, struktūrinių elementų tarpusavio sujungimo metodai, naudojamos dažnai kardinaliai skirtingų cheminių, fizikinių, mechaninių savybių medžiagos. Be to, skirtingos medžiagos gali sudaryti ne tik atskirus kompozito sluoksnius, bet gali būti naudojamos net ir tame pačiame sluoksnyje, pvz., metalų, junginiai, gauti įvairiais metalurgijos būdais ir pan. Dėl šių priežasčių visiems kompozitams netinka vienas NDT metodas. Ne paskutinėje vietoje yra ir metodo įrangos kaina, bei naudojimo kaštai.

3.1. Jusliniai metodai

Prie tokių metodų galima priskirti vizualią apžiūrą ir stuksenimo metodą. Tai patys paprasčiausi metodai, kurie pagrįsti vien tik žmogaus (operatoriaus, techniko) išlavintais jūtimais (rega ir klausia) bei patirtimi.



12 pav. Skaitmeninio plaktuko schema [15]

Paprasto, vientiso ir paprastai prieinamo (pvz., gamybos procese) paviršiaus vizualinė apžiūra atliekama plika akimi, tuo tarpu sunkiau pasiekiamų galutinių konstrukcijų (pvz., lėktuvo) vietų vizualinė apžiūra atliekama papildomai pasitelkus tam pritaikytus prietaisus boroskopus, veidrodžius. Šiuo metodu galima aptikti tik paviršinius defektus.

Naudodamas stuksenimo metodą, operatorius nedideliu plaktuku stuksena tiramos struktūros paviršių ir klausosi aido. Pagal aido tembrą nusprendžiama apie objekto struktūros vientisumą. Šis metodas leidžia tik įvertinti galimo defekto buvimą ir apytikslę lokalizaciją, tačiau neleidžia įvertinti nei defekto dydžio, nei pobūdžio. Tiesa, kinų inžinieriai pristatė išmanųjį skaitmeninį plaktuką, kuris turėtų padėti tiksliau įvertinti tiriamo objekto būklę.

3.2. Vibraciniai metodai

Šio tipo metodų veikimas pagrįstas daugiau ar mažiau pažeistos struktūros vibracijų pokyčiais lyginant su tokios pat nepažeistos struktūros atsaku į išorinį poveikį. Bet kurios pažeistos struktūros dinaminės savybės pakinta, o kadangi dinaminis struktūros modelis gali būti aprašomas naudojant tokias savybes kaip masė, standumas, mechaninių virpesių slopimas, tad galima daryti išvadą, kad pažeistos srities vibracijų dinamika skirsis nuo sveikosios. Taikant šiuos metodus dažniausiai būtina žinoti tiriamo objekto (prieš pažeidimą) vibracinės dinamikos pobūdį, kad gavus pažeisto bandinio

tyrimo rezultatus, būtų galima juos tarpusavyje lyginti ir daryti išvadas apie pažeidimų pobūdį, mastą ir kitas konkrečiu atveju aktualias savybes [10].

Dalis visų sugalvotų ir taikomų vibracinių metodų yra paremta natūralių objekto vibracijų dažninės charakteristikos palyginimu su tokio pat pažeisto objekto išmatuotomis vibracijų dažninėmis charakteristikomis. Tyrimo metu bandinį galima apkrauti papildomais įtempiais sukant, lenkiant ir pan. Toks dažninių charakteristikų palyginimas leidžia aptikti delaminacijas ir net pakankamai mažus defektus, tačiau naudojant vien tik tokį metodą negalima tiksliai įvertinti defekto tipo, dydžio, padėties, orientacijos bandinyje [16].

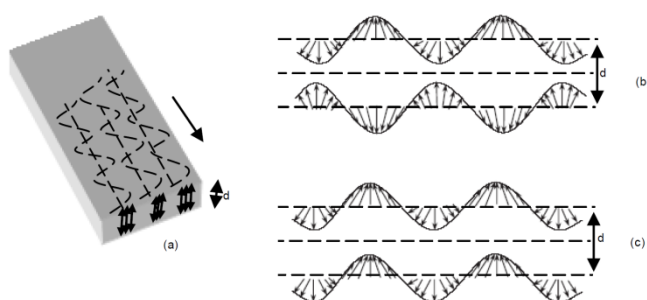
Šio tipo vibraciniai metodai yra lengvai atliekami, nebrangūs, jautrūs pažeidimų užfiksavimui, tačiau matavimuose dažnai pasitaiko klaidų, metodai jautrūs aplinkos poveikiui. Šie metodai tinkamiausi delaminacijų ir įtrūkių aptikimui [6].

Dar vienas vibracinis metodas grįstas mechaninių virpesių slopinimo objekte pobūdžiu. Bandymais nustatyta, kad šiuo principu grįsti metodai yra jautresni lyginant su dažninių charakteristikų matavimu grįstais vibraciniais metodais [10]. Galima aptikti įtrūkius, delaminacijas, atsiklijavimus, armuojančio pluošto pažeidimus.

3.3. Garso bangų sklidimu ir savybėmis paremti metodai

Lembo (arba nukreiptųjų) bangų metodas, tai vienas iš ultragarso bangų sklidimo ypatumais paremtų metodų, defektams kompozituose aptikti pradėtas naudoti dar 19 praėjusio amžiaus dešimtmetyje, tačiau vis dar susilaukiantis daug dėmesio iš tyrėjų.

Lembo bangas galima įsivaizduoti kaip struktūros elastinius sutrikdymus, kurie juda per kietą medžiagą nemažėjančiu intensyvumu. Tokioje bangoje sutrikdytos medžiagos dalelės gali judėti daugeliu skirtingų modų (t. y. gali turėti daug skirtingų energijų). Bangų modos priklauso nuo inicijuojančios bangos generavimo sistemos, nuo inicijuojančios bangos kritimo į tiriamą paviršių kampo, keitiklio centrinio dažnio ir kitų parametru.



13 pav. a) Lembo bangos sklidimas medžiagoje, b) simetrinė bangos moda, c) asimetrinė bangos moda [17]

Modos klasifikuojamos į simetrines ir asimetrines [17]. Bangoje sužadintos dalelės pirmyn sklinda elipsinėmis orbitomis. Judėjimo greičio vektoriaus kryptimi orientuotos Lembo bangos priklauso ne tik nuo medžiagos tipo, bet ir nuo bandinio storio bei pačios bangos dažnio. Dažnio, fazinio ir grupinio bangos greičio, inicijuojančios bangos kritimo kampo, modos ir storio tarpusavio sąryšiams nusakyti sudaromos sklaidos kreivės [18].

Bandymais nustatyta, kad GLARE padidėjus delaminacijos plotui, Lembo bangos grupinis greitis taip pat padidėja ir pasiekia aliuminyje sklindančios Lembo bangos greitį, tačiau jo neviršija [18].

Lembo bangos paviršiumi sklinda ilgą atstumą nenukrypdomos, tad galima tirti didelius plotus nejudinant pačio jutiklio. Šis metodas yra nebrangus, galima užfiksuoti vidinius struktūros pažeidimus nedideliame gylyje [17].

Metodo taikymą komplikuoja viename dažnyje dirbančios kelios bangos modos, taip pat šiuo metodu negalima aptikti labai mažų defektų (pvz., labai koncentruotų korozijos židinių ir dėl jų atsirandančių mažyčių skylučių struktūroje). Metodo taikymas reikalauja gerai paruošto ir įgudusio personalo. Lembo bangomis galima aptikti praktiškai visų tipų defektus metalo sluoksniuose, kompozito matricoje, armuojančiame pluošte [17].

Akustinės emisijos metodas pagrįstas tuo, kad kiekvienas laminato struktūros pažeidimas (įtrūkis, delaminacija, atsiklijavimas ir pan.) gali didėti jį paveikus atitinkamo dydžio išorinė jėga. Pažeidimas didėdamas atpalaiduoja tam tikrą kiekį energijos, kuri trumpalaikės bangos pavidalu sklinda medžiagoje. Prie bandinio paviršiaus pridėjus akustiškai jautrų detektorių, galima tuos defekto skleidžiamus impulsus užfiksuoti [19].

Šis metodas turi gana didelį jautrumą tiriant defektų didėjimą kompozitinėse struktūrose, tačiau juo negalima aptikti nesikeičiančių defektų. Norint kuo geriau panaudoti šį metodą, reikia žinoti tikslų garso bangos sklidimo greitį ir slopinimą kompozite. Metodas nepatogus dėl to, kad reikalinga papildomai apkrauti tiriamą objektą [19]. Taip pat reikalingas gerai paruoštas ir įgudęs personalas, gebantis susieti gautus duomenis su specifiniais pažeidimų susidarymo mechanizmais.

Naudojant akustinės emisijos metodą galima aptikti išilgai sluoksnio susidarančius trūkius, armuojančio pluošto pažeidimus, delaminacijas, matricos atsiklijavimus, matricos mikro įtrūkimus.

Ultragarso metodas paremtas ultragarso bangos išspinduliavimu į tiriamą objektą ir bangos aido užfiksavimu. Išmatavus laiką nuo bangos išspinduliavimo iki jos aido (grįžimo iki keitiklio) užfiksavimo, bei žinant bandinio tankį, garso bangos sklidimo greitį jame, bangos kritimo į bandinį kampą, galima apskaičiuoti bandinio storį arba nustatyti ar bandinyje yra kokių defektų. Naudojant ultragarso galima gana tiksliai nustatyti defektų matmenis, jų lokalizaciją tūryje.

Ultragarso taikymas kompozitinių medžiagų tyrimuose yra sudėtingesnis, lyginant su metalais, dėl daugiasluoksnės kompozitų struktūros bei naudojamų anizotropinių medžiagų. Kompozituose dėl daugelio vidinių paviršių ultragarso banga daugelį kartų atsispindi. Dėl to atspindys nuo defekto yra iškraipomas, o gauti rezultatai sunkiau interpretuojami. Tad paprastai reikalingas papildomas grįžusio signalo filtravimas, stiprinimas.

Ultragarsu galima aptikti delaminacijas, porėtumą, įtrūkius, atsiklijavimus bei įvertinti kai kurias medžiagos mechanines savybes. Ultragarsu galima aptikti defektus ankstyvojoje jų susidarymo stadijoje. Metodas yra jautrus, nebrangus, lyginant su daug kitų metodų, rezultatai pakankamai nesunkiai interpretuojami. Metodo trūkumai pasireiškia dideliu medžiagoje sklindančio signalo susilpnėjimu ir išsklaidymu kompozitinių medžiagų atveju. Dėl to ultragarso metodu struktūras tirti galima ribotame gylyje, o gauti rezultatai yra gana nedidelio kontrasto.

Naudojant vibracinį-akustinį metodą, tiriamasis objektas sužadinamas pulsuojančiu signalu ir tuo pat metu zondojuamas kitu tiriamuoju signalu. Šiuo metodu galima nustatyti įvairius trūkius,

delaminacijas, atsiklijavimus struktūroje. Metodas sėkmingai naudojamas su metalais, tačiau panaudojimo galimybės kompozitinėse struktūrose kol kas yra ribotos ir reikalauja papildomų tyrimų.

3.4. Jutiklių naudojimas

Technologiškai dabar jau yra įmanoma įvairių konstrukcijų, pagamintų iš įvairių medžiagų, tarp jų ir kompozitinių, būklę stebėti ir atsiradusius pažeidimus vertinti jau viduje sumontuotais pjezoelektriniais jutikliais, ir tai daryti realiu laiku. Toks metodas yra ir efektyvus kainos ir kokybės atžvilgiu. Jutikliai turi būti sumontuoti struktūros gamybos metu. Labai svarbų vaidmenį atlieka ir jutiklių konstrukcija bei sumontavimo ypatumai, duomenų siuntimo ir surinkimo bei apdorojimo atlikimas. Jutiklių įdiegimas didina pačios struktūros masę, tad svarbu yra jutiklių dydis.

Masmoudi'is, El Mahi'is, ir Turki'is (2015 m.) bandymais nustatė, kad tokie papildomi jutikliai niekaip neveikia struktūros bendros mechaninės būklės, tačiau tos struktūros vietos, kuriose sumontuoti jutikliai, yra mažiau atsparios smūgiams ir kitiems pažeidimams, lyginant su ta struktūra, kur jutikliai sumontuoti ant paviršiaus [10].

Šis metodas leidžia fiksuoti pažeidimų atsiradimą ir jų evoliuciją, yra nebrangus, didelio tikslumo ir jautrumo. Metodo trūkumas yra tas, kad struktūrai pridedamas papildomas svoris ir veikiama kai kurios mechaninės struktūros savybės. Taikant metodą galima aptikti įtrūkius, delaminacijas, atsiklijavimus, matricos pažeidimus, paviršiaus nelygumus [10].

Sūkurinių srovių metodas tinkamas tik laidžioms elektros srovei medžiagoms. Tad iš principo kompozitiniuose metalų laminatuose jis gali būti naudojamas metalo sluoksnių tyrimui. Šio metodo veikimas grįstas elektromagnetizmu. Detektoriuje esančia rite paleidžiama tekėti nustatyto dažnio elektros srovė sukuria magnetinį lauką. Veikiančią detektorių priartinus prie tiriamo objekto paviršiaus, detektoriaus magnetinis laukas tiriamo objekto paviršiuje indukuoja nestiprias sūkurines sroves, kurias taip pat sukuria savo magnetinį lauką. Tokiu būdu sūkurinių srovių magnetinis laukas sukuria reaktyvią elektros srovę, kurios tekėjimas priešinasi jutikliu tekančios pirminės elektros srovės tekėjimui. Dėl šios priežasties pasikeičia jutiklio elektrinis impedansas, kurio pokytis ir yra fiksuojamas įrangos ir daromos išvados apie tiriamąjį bandinį [20].

Naudojant šį metodą nebūtinai tiesioginis kontaktas su bandinio paviršiumi, užtenka jį tik priartinti reikiamu atstumu, kadangi elektromagnetinės jėgos veikia per atstumą. Galima aptikti įtrūkius, delaminacijas, porėtumą [20].

Elektrinio laidumo metodas gali būti naudojamas laidžiose elektros srovei medžiagose ir anglies pluoštu armuotuose kompozituose. Kaip žinia, anglies pluoštas yra laidus elektros srovei, ir juos tokiose kompozitinėse medžiagose galima laikyti savotiškais jutikliais. Bandymų metu pastebėta, kad anglies pluošto kompozituose elektrinis laidumas pasireiškia išilgai pluošto ir skersai pluošto sluoksniui. Bandymais nustatyta, kad bet koks pažeidimas kompozite mažina jo elektrinį laidumą [21, 22].

Šis metodas yra jautrus mažiems defektams, nebrangus. Metodo jautrumas priklauso nuo armuojančio pluošto ar laidžios medžiagos tūrio ir elektrodų padėties. Naudojant metodą galima aptikti armuojančio pluošto pažeidimus, delaminacijas, atsiklijavimus, įtrūkius [21, 22].

Infraraudonųjų spindulių termografija pagrįsta tuo principu, kad kiekvienas objektas, kurio temperatūra didesnė už absoliutųjį 0, infraraudonųjų spindulių diapazone skleidžia šiluminį foną,

kuris gali būti aptinkamas panaudojant infraraudonoju režimu veikiančius optinius jutiklius. Kiekvienas elektrinis ar mechaninis procesas yra lydymas energijos išsiskyrimu, padidėjusios šilumos pavidalu. Taigi, struktūroje susidarę defektai taip pat yra matomi kaip kitokios temperatūros sritys, nei bendras objekto infraraudonasis spinduliavimas. Infraraudonųjų spindulių termografija yra nekontaktinis metodas, turintis plačias pritaikymo galimybes, pvz., judančių struktūrų tyrimas, sunkiai pasiekiamų, karštų, pavojingų ir pan. paviršių tyrimas, lengvai pažeidžiamų ar užteršiamų paviršių tyrimas ir pan. Šiuo metodu galima greitai ištirti didelius plotus, gauti tikslų vizualinį visos struktūros būsenos paveikslą (infraraudonajame kontekste). Metodo ribojimą komplikuoja brangi ir jautri įranga, taip pat sunku aptikti defektus, esančius giliau nuo paviršiaus [23, 24].

Naudojant infraraudonųjų spindulių termografiją galima aptikti išilginius kompozito sluoksnių įtrūkius, svetimkūnius, smūgio pažeidimus, delaminacijas, drėgmės sankaupas, atsiklijavimus, medžiagos nuovargio požymius [23, 24].

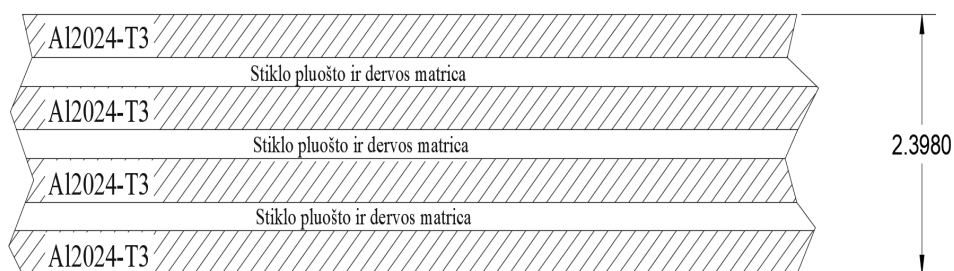
3.5. Apibendrinimas

Atlikus literatūros analizę sužinota, kad kompozitinėse medžiagose dėl sudėtingos jų vidaus struktūros gali susidaryti labai įvairūs defektai, tačiau dažniausiai pasitaikantys yra atsiklijavimai, delaminacijos, oro burbulai. Atsiradus tokiems defektams visa struktūra dažniausiai iš karto visiškai nesuyra, nors toliau eksploatacijos metu veikiant išorinėms ir (ar) vidinėms jėgoms tokie defektai gali didėti ir jau tik pasiekę kritinius matmenis padaryti reikšmingą žalą visai struktūrai. Tokiais atvejais svarbiausia laiku pastebėti defektus, kol jie dar nėra pasiekę pavojingų matmenų atliekant periodinius detalių patikrinimus. Tokiam tikslui reikalingi nebrangūs, pakankamai neimlūs laikui ir nesudėtingi metodai. Įvairūs vibraciniai tyrimo metodai nėra tinkami kompozitinių medžiagų tyrimui iš esmės dėl struktūros pobūdžio, kadangi tokio tyrimo metu vibracijos veikiami defektai gali dar labiau padidėti, susidaryti nauji defektai ar net suirti visas tiriamas bandinys. Infraraudonųjų spindulių termografijos ar Rentgeno spinduliuotės naudojimas komplikotas dėl įrangos sudėtingumo ir didelės kainos. Be to, Rentgeno spinduliuotė gali paveikti kompozituose naudojamų klijų, dervų ir kitų organinių junginių fizikines, chemines, mechanines savybes neigiamai. Įvairūs ultragarsiniai metodai yra optimaliausi vertinant pagal įrangos kainą, sudėtingumą, duomenų analizės ypatumus, imlumą laikui, žmogiškiesiems ištekliams.

4. Teorinis modeliavimas

Prieš atliekant realius eksperimentus su GLARE bandiniu yra prasminga atlikti tokio tipo struktūros teorinį modeliavimą kompiuteriu. Tam tikslui panaudotas specializuotas programinis paketas „CIVA“. Kompiuterinis modeliavimas leidžia išsamiau susipažinti su ultragarso signalo sklidimo ypatumais tokio tipo struktūroje, bei leidžia įvertinti, kuris tyrimo ultragarsu metodas (aido metodas, fokusuotas keitiklis, gardelė ir pan.), bei jo parametrai yra tinkamiausi bandant įvertinti defektus tokiaame daugiasluoksniame ploname bandinyje realiomis sąlygomis.

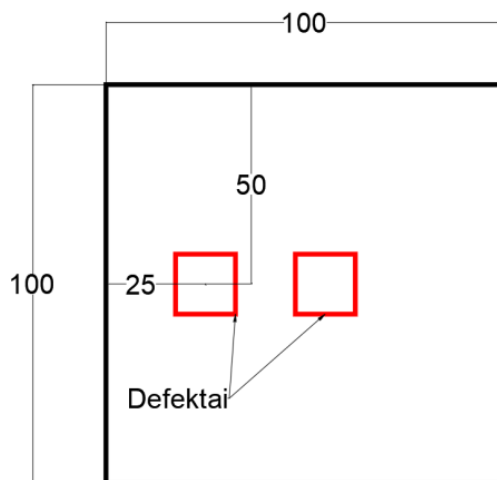
14 – 16 paveiksluose pateiktas bandinio modelis. Bandinio modeliui sukurti pasirinktas realus gaminy, kurio gamybinis pavadinimas yra „GLARE 2B-4/3–0.4“. Šitoks kompozitas turi 4 aliuminio lydinio Al2024-T3 sluoksnius ir 3 matricos, kuri sudaryta iš epoksidinės dervos, sustiprintos stiklo pluoštu, sluoksnius.



14 pav. Sumodeliuoto bandinio struktūros sluoksnių išsidėstymas

Matrica orientuota 90 laipsnių kampu aliuminio sluoksnių atžvilgiu. Kiekvienas aliuminio sluoksnis yra 0,4 mm storio, o kiekvieno matricos sluoksnio storis 0,266 mm.

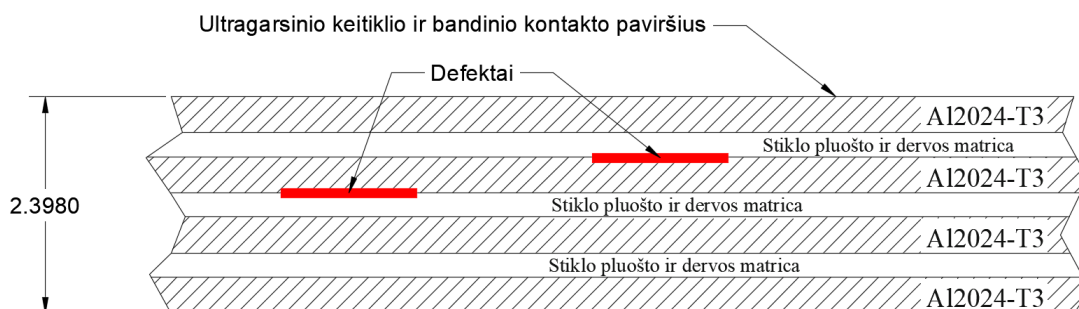
Tyrimo objekte suformuoti du vienodo dydžio defektai, kurie yra skirtingame gylyje. Defektai suformuoti aliuminio ir matricos paviršių riboje, imituojant delaminacijas ar atsiklijavimo defektus, kadangi kompozitinėse struktūrose, o ypač laminatuose, tokie defektai yra vieni dažniausiai pasitaikančių.



15 pav. Sumodeliuoto bandinio ir defektų forma, matmenys ir padėtys (matmenys ir atstumai pateikti mm)

Taip pat svarbu paminėti, kad vienas defektas yra patalpintas prieš aliuminio sluoksnį, o kitas – už jo

(prieš matricos sluoksnį). Defektas, esantis arčiau bandinio vidurio, yra arčiau paviršiaus, o kitas defektas – giliau.



16 pav. Defektų išsidėstymas sumodeliuoto bandinio sluoksniuose.

Defektų atstumai vienas nuo kito yra tik orientaciniai, kadangi tikslus atstumų atvaizdavimas yra nepraktiškas dėl didelio santykio tarp bandinio storio ir jo kraštinės matmenų. Defektų gylis ir padėtis sluoksnių atžvilgiu yra tiksliai tokie kaip sumodeliuota.

Su tokiu bandinio modeliu toliau bus atliekama keletas tyrimo ultragarsu teorinių modeliavimų. Bus imituojamas imersinis metodas su nefokusuojančiais keitikliais, imersinis metodas su fokusuojančiais keitikliais, bei kontaktinis metodas, naudojant fazuotas gardeles nefokusuojančiu ir fokusuojančiu režimais. Taip pat bus išbandomi skirtingi visų tipų keitiklių darbo dažniai.

4.1. Imersinio metodo su nefokusuojančiais keitikliais modeliavimas

4.1.1. Modeliavimo aprašymas ir keitiklių parametrai

Imersinio metodo atveju buvo atlikti modeliavimai su 3 skirtingų darbinų dažnių nefokusuojančiais ultragarsiniais keitikliais. Modelių aprašymams naudoti realių keitiklių parametrai, kurie pateikti 2 lentelėje. Keitiklių dažniai pasirinkti neatsitiktinai. 5 MHz darbinio dažnio keitiklis pasirinktas todėl, kad toks dažnis dažnai naudojamas aviacijoje, vykdant orlaivio metalinių dalių tyrimus ultragarsu. Tad teorinis modeliavimas preliminariai parodys, kokius rezultatus pavyktų gauti su 5 MHz darbinio dažnio keitikliu tiriant kompozitines detales.

20 MHz dažnio keitiklis pasirinktas dėl tiriamos struktūros nedidelio storio. Taip pat didelę įtaką rezultatams turėtų turėti ir bandinį sudarantys keli skirtingos medžiagos ploni sluoksniai. Tad, didesnis keitiklio dažnis, tikėtina, leis gauti geresnę atspindžių nuo skirtingų sluoksnių, o tame tarpe, ir defektų, atskyrimą. 10 MHz dažnis pasirinktas kaip tarpinis variantas. Gauti rezultatai su šiuo dažniu leis patikimiau įvertinti tendenciją, kuria kryptimi (didesnio ar mažesnio dažnio) rezultatai gerėja (blogėja).

2 lentelė. Teoriniam modeliavimui pasirinktų realių imersinių keitiklių pagrindiniai parametrai

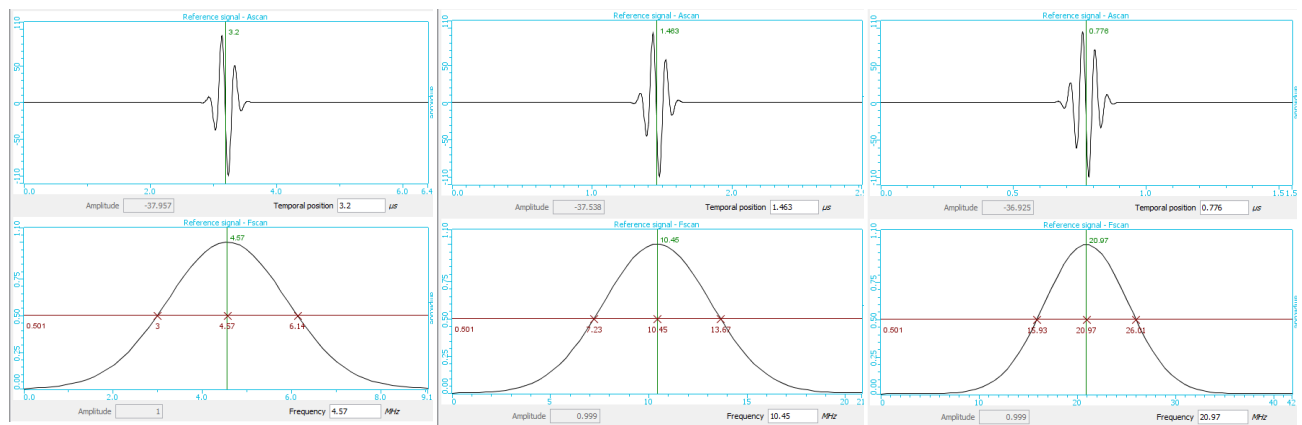
Modelis Nr.1 (5 MHz keitiklis)		Modelis Nr.2 (10 MHz keitiklis)		Modelis Nr.3 (20 MHz keitiklis)	
Keitiklis	Olympus V309-SU	Keitiklis	Olympus V311-SU	Keitiklis	Olympus V317-SU
Tipas	Imersinis	Tipas	Imersinis	Tipas	Imersinis
Forma	Apskritiminis, vieno elemento	Forma	Apskritiminis, vieno elemento	Forma	Apskritiminis, vieno elemento

Skersmuo	12,7 mm	Skersmuo	12,7 mm	Skersmuo	6,35 mm
Centrinis dažnis	4,57 MHz	Centrinis dažnis	10,45 MHz	Centrinis dažnis	20,97 MHz
Dažnių juostos plotis	68,75% prie -6 dB	Dažnių juostos plotis	61,48% prie -6 dB	Dažnių juostos plotis	47,99% prie -6 dB
Fazė	111°	Fazė	111°	Fazė	111°
Vandens sluoksnio storis	25,68 mm	Vandens sluoksnio storis	25,88 mm	Vandens sluoksnio storis	26,19 mm

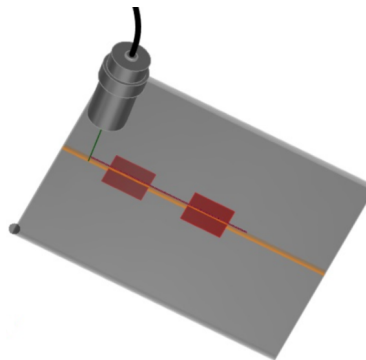
Olympus V309-SU

Olympus V311-SU

Olympus V317-SU



17 pav. Ultragarinių keitiklių generuojamų signalų parametrai „CIVA“ aplinkoje



18 pav. Sumodeliuotas ultragarinio imersinio keitiklio skenavimo kelias per bandinį visuose imersinio tyrimo metodo modeliuose

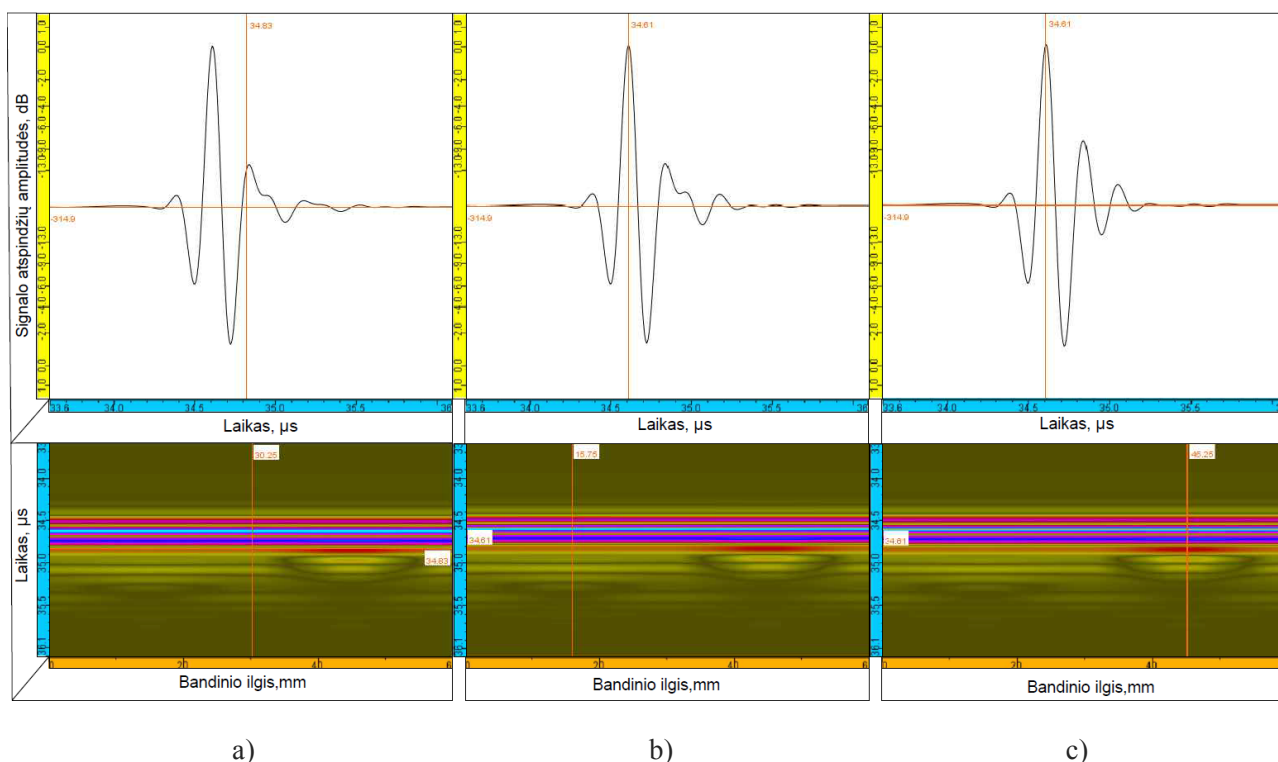
Visuose imersinio metodo modeliuose pasirinkta, kad keitikliai judės tik viena Y ašimi, o modeliai bus dvimačiai (2D). „CIVA“ programiniame pakete nurodyta, kad bandinys kiekviename modelyje bus iš visų pusių supamas vandens. Kiekvienas keitiklis atliks 240 žingsnių, kurių kiekvieno dydis 0,25 mm.

4.1.2. Rezultatai

Modelis Nr.1 (5 MHz keitiklis)

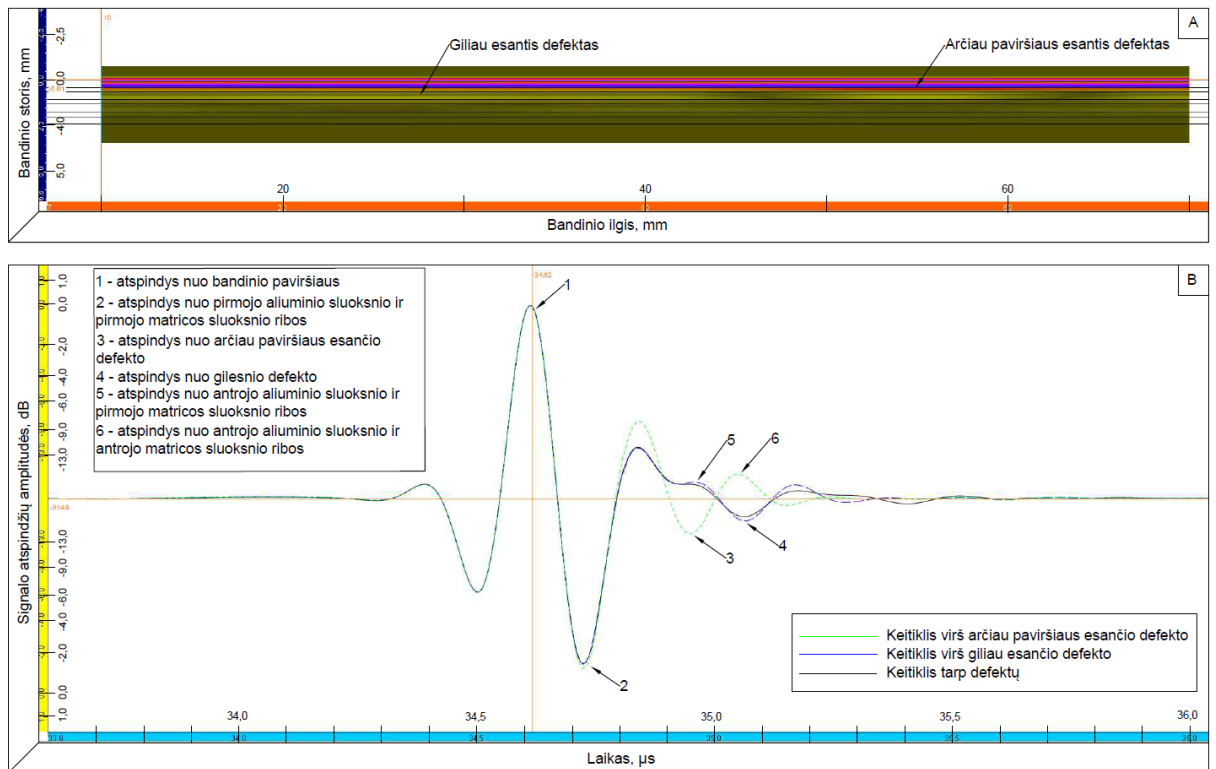
Žemiau pateikti modeliavimo su 5 MHz keitikliu rezultatai.

19 paveiksle palyginimui pateikti ultragarsinio signalo atspindžių vaizdai trimis atvejais – kai keitiklis virš arčiau paviršiaus, bei giliau esančių defektų ir kai keitiklis patrauktas nuo defektų. Vertikalios linijos ultragarso „B“ tipo vaizduose rodo keitiklio padėtis defektų atžvilgiu. Aiškiai matyti, kad giliau esantis defektas duoda labai silpną atspindį ir atspindžio signalo forma praktiškai nesiskiria nuo signalo atspindžio kai keitiklis patrauktas nuo defektų, tad giliau esantis defektas būtų labai sunkiai aptinkamas.



19 pav. Imersinio metodo modeliavimo su 5 MHz keitikliu A ir B vaizdai: a) keitiklis patrauktas nuo defektų, b) keitiklis virš giliau esančio defekto, c) keitiklis virš arčiau paviršiaus esančio defekto

20 paveiksle pateiktas ultragarso B vaizdas ir bandinio pjūvis atvaizduojant jo sluoksnių struktūrą. Keitiklis B vaizdo atveju yra patrauktas nuo defektų. A vaizde parodyti signalų atspindžiai keitikliui esant trijose padėtyse – virš abiejų defektų ir patrauktas nuo defektų.



20 pav. Bandinio B vaizdas ir sluoksnių struktūra, bei atspindžių amplitudinės charakteristikos

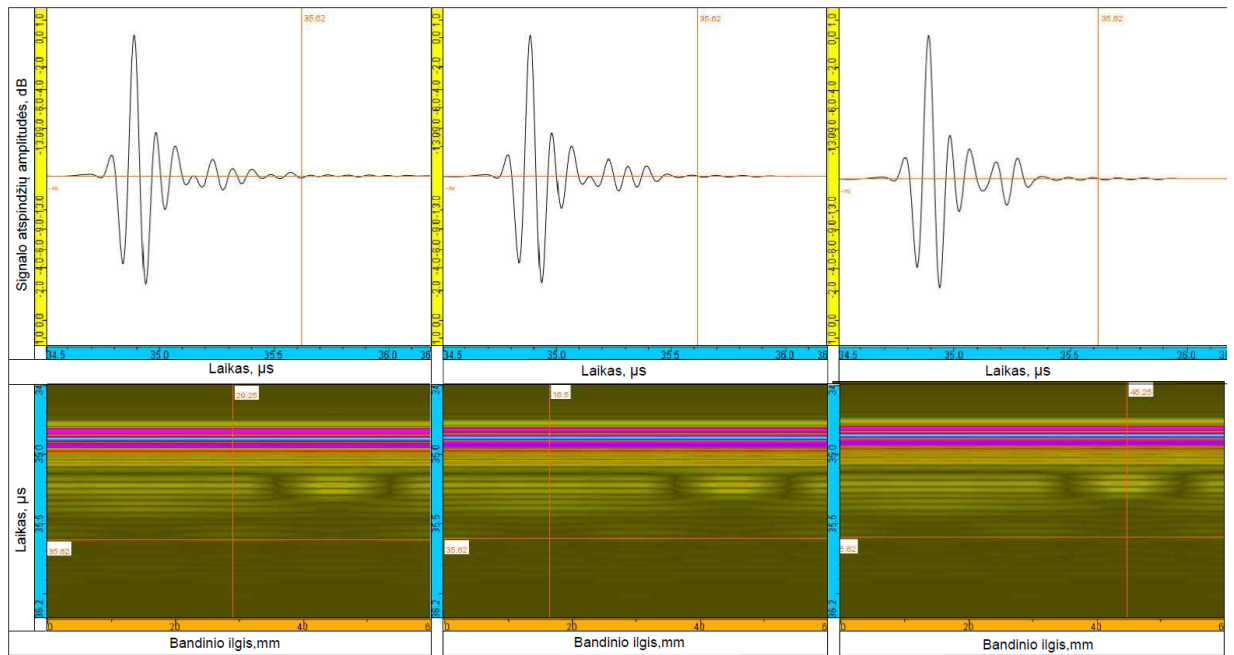
Kaip matyti, atspindžių amplitudės skiriasi nežymiai, o tiksliai įvardinti nuo kurio sluoksnio gaunami atspindžiai be papildomų signalo apdorojimo priemonių nelabai įmanoma. Nustatyta, kad pirminio ultragarso signalo atspindžiai nuo bandinio tarp sluoksnių ribų, esančių giliau nei bandinio vidurys, yra nykstamai mažų amplitudžių ir prasingos informacijos neteikia.

Teorinis modeliavimas aiškiai parodo, kad, taikant tokį tyrimo metodą ir tokį ultragarsinį keitiklį, defektų, esančių giliau bandinio vidurio, jau nepavyktų užfiksuoti.

Modelis Nr.2 (10 MHz keitiklis)

Žemiau pateikti modeliavimo su 10 MHz keitikliu rezultatai.

21 paveiksle palyginimui pateikti ultragarsinio signalo atspindžių vaizdai trimis atvejais – kai keitiklis virš arčiau paviršiaus, bei giliau esančių defektų bei kai keitiklis patrauktas nuo defektų. Vertikalios linijos ultragarso B vaizduose rodo keitiklio padėtis defektų atžvilgiu. Kaip ir atveju su 5 MHz keitikliu, taip ir dabar, aiškiai matyti, kad giliau esantis defektas duoda labai silpną atspindį. Atspindžio signalo forma labai nežymiai skiriasi nuo signalo atspindžio kai keitiklis patrauktas toliau nuo defektų, tad giliau esantis defektas taip pat būtų labai sunkiai aptinkamas. Taip pat šiuo atveju matyti, kad signalas labiau slopinamas kai keitiklis virš defektų, nei tuomet kai keitiklis yra patrauktas nuo defektų. To priežastis galėtų būti defekto savybės. Paprastai defektas (delaminacija, atsiklijavimas) sukuria tuštumą, kurioje yra oro. Kaip žinia, tokios tuštumos akustinės savybės (pvz., akustinė varža) smarkiai skirsis nuo aplink esančių bandinio sluoksnių savybių, dėl ko gerokai didesnė akustinės energijos dalis bus atspindėta atgal link paviršiaus.



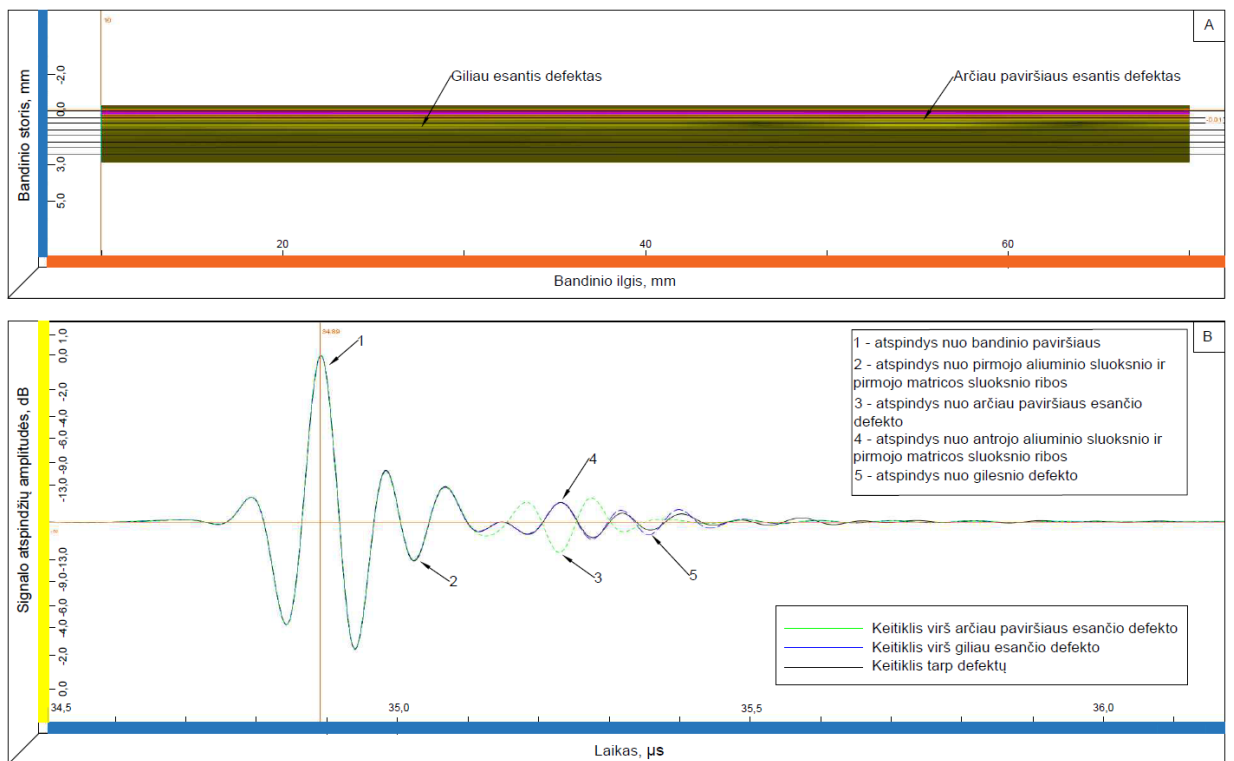
a)

b)

c)

21 pav. Imersinio metodo modeliavimo su 10 MHz keitikliu A ir B vaizdai: a) keitiklis patrauktas nuo defektų, b) keitiklis virš giliau esančio defekto, c) keitiklis virš arčiau paviršiaus esančio defekto

22 paveiksle pateiktas ultragarso B vaizdas ir bandinio pjūvis atvaizduojant jo sluoksnių struktūrą. A vaizde parodyti signalų atspindžiai keitikliui esant trijose padėtyse – virš abiejų defektų ir patrauktas nuo defektų.



22 pav. Bandinio B vaizdas ir sluoksnių struktūra, bei atspindžių amplitudinės charakteristikos

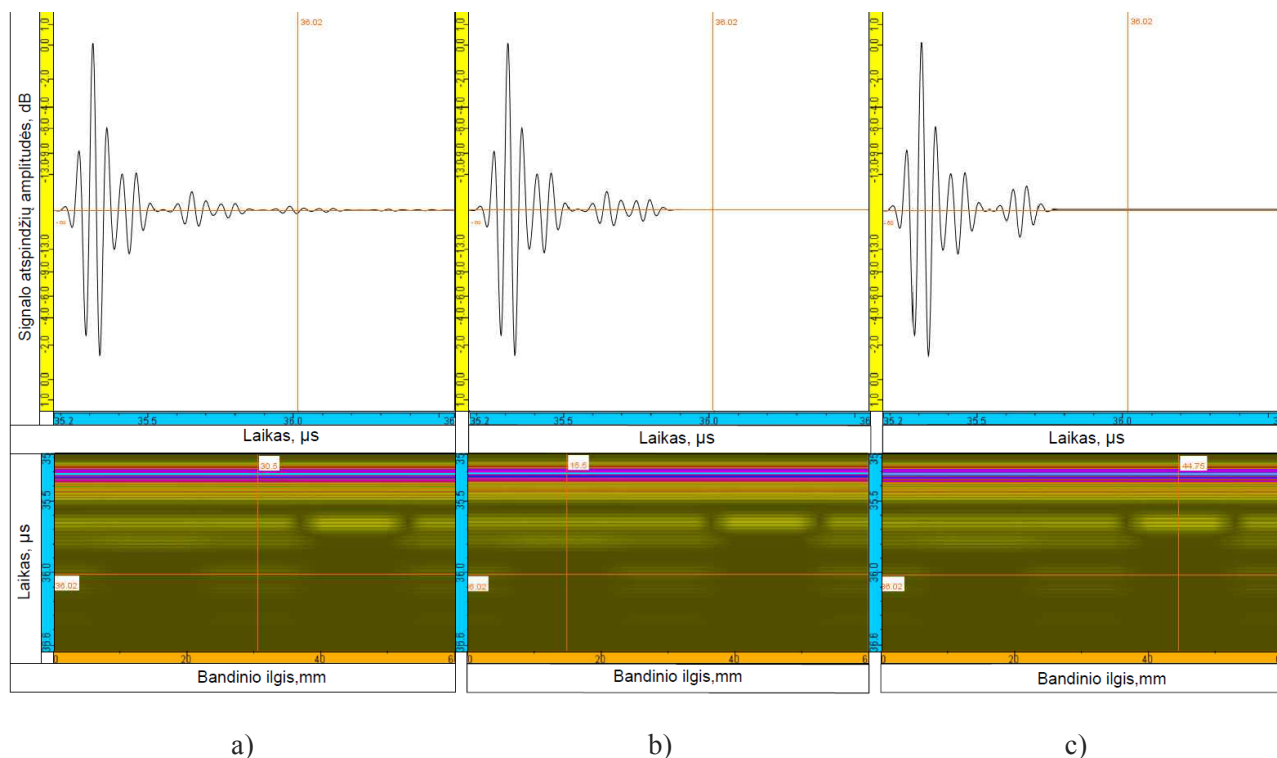
Matome, kad naudojant keitiklį su dvigubai didesniu darbinio dažniu, rezultatai kiek skiriasi. Pirmiausia, amplitudinė charakteristika jau yra kiek lengviau analizuojama. Taip pat galima pastebėti, kad nors signalo prasiskverbimo į bandinį gylis yra labai panašus kaip ir atveju su 5 MHz darbinio dažnio keitikliu, tačiau dėl didesnio signalo dažnio į tą patį gylį prasiskverbia didesnis skaičius ultragarso impulsų ir atitinkamai toks pat skaičius jų grįžta atsispindėję ir yra užfiksuojami. Matyti, kad ir šiuo atveju pirminio ultragarso signalo atspindžiai nuo bandinio tarpsluoksnių ribų, esančių giliau nei bandinio vidurys, yra nykstamai mažų amplitudžių.

Kaip rodo rezultatai, naudojant 10 MHz darbinio dažnio ultragarsinį keitiklį, defektų, esančių giliau bandinio vidurio irgi nepavyktų užfiksuoti.

Modelis Nr.3 (20 MHz keitiklis)

Žemiau pateikti modeliavimo su 20 MHz keitikliu rezultatai.

23 paveiksle palyginimui pateikti ultragarsinio signalo atspindžių vaizdai trimis atvejais – kai keitiklis virš arčiau paviršiaus, bei giliau esančių defektų, bei kai keitiklis patrauktas nuo defektų. Vertikalios linijos ultragarso B vaizduose rodo keitiklio padėtis defektų atžvilgiu. Gautus rezultatus lyginant su ankstesniais, galima daryti pakankamai tvirtą išvadą, kad gilesnis defekto aptikimas būtų kompliktuotas visais trimis atvejais.



23 pav. Imersinio metodo modeliavimo su 20 MHz keitikliu A ir B vaizdai: a) keitiklis patrauktas nuo defektų, b) keitiklis virš giliau esančio defekto, c) keitiklis virš arčiau paviršiaus esančio defekto

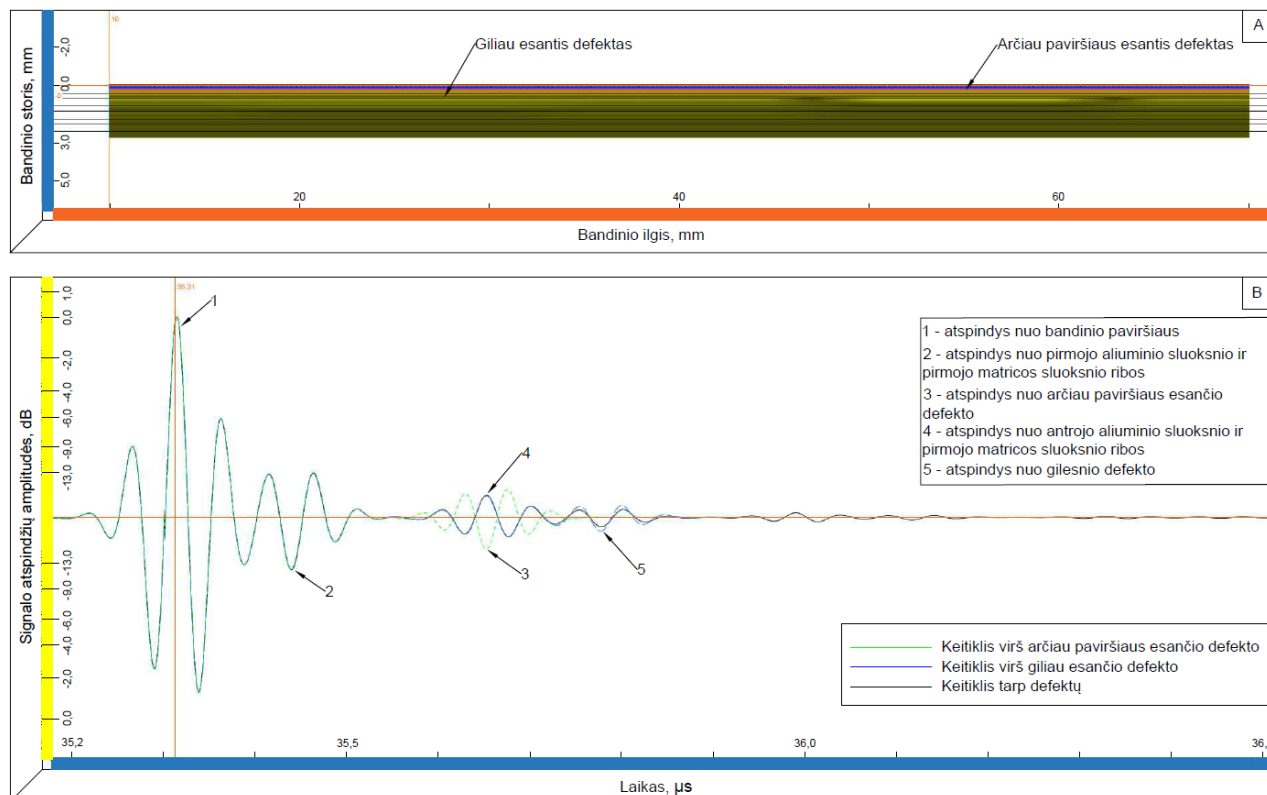
Kaip ir modelio su 10 MHz keitikliu rezultatuose, taip ir šiuo atveju matyti, kad ultragarso signalas yra slopinamas stipriau kai keitiklis virš defektų, nei tuomet kai keitiklis yra patrauktas nuo defektų.

Bent jau analizuojant teorinių imersinio tyrimo modelių rezultatus galima daryti prielaidą, kad apie giliau esančių defektų, ypač turinčių ženkliai skirtingas akustines savybes nei tiriamo objekto,

egzistavimą galima įtarti remiantis daugiau signalo slopinimo dėsningumais nei bandyti tokią informaciją gauti iš užfiksuojamų labai mažos amplitudės atspindžių signalų.

Aišku, galutinius apibendrinimus bus galima daryti atlikus realius eksperimentus.

24 paveiksle pateiktas ultragarso B vaizdas ir bandinio pjūvis atvaizduojant jo sluoksnių struktūrą. Keitiklis B vaizdo atveju yra patrauktas nuo defektų. A vaizde parodyti signalų atspindžiai keitikliui esant trijose padėtyse – virš abiejų defektų ir patrauktas nuo defektų.



24 pav. Bandinio B vaizdas ir sluoksnių struktūra, bei atspindžių amplitudinės charakteristikos

Matome, jog trečio bandymo rezultatai yra informatyviausi ir lengviausiai analizuojami. Praktiškai galima nenaudoti papildomų gauto rezultato apdorojimo priemonių.

Taip pat galima pastebėti, kad 20 MHz dažnio signalas slopinamas mažiausiai lyginant su pirmais dviem atvejais. Tad teoriškai būtų galima aptikti ir defektus esančius kiek giliau, stebint būtent signalo visišką nuslopimą, jam susidūrus su defektu.

Nepaisant to, išdiferencijuoti giliau esančius defektus pagal gyli greičiausiai būtų neįmanoma dėl atspindžių nykstamai mažos amplitudės.

4.2. Imersinio metodo fokusuojančiais keitikliais, modeliavimas

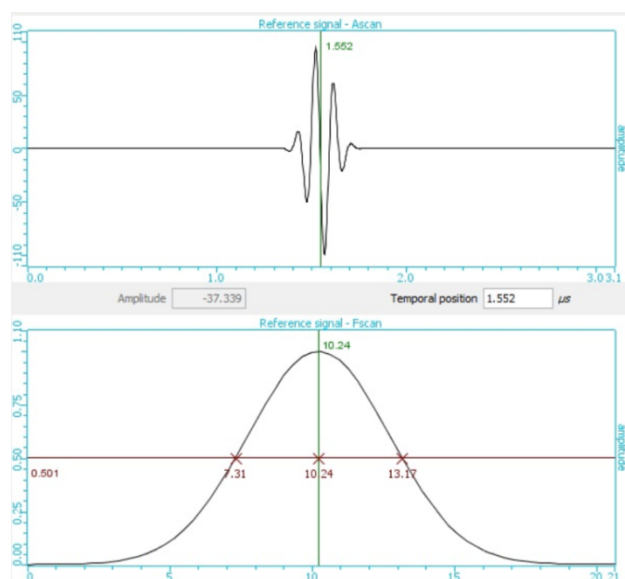
4.2.1. Modeliavimo aprašymas ir keitiklių parametrai

Teoriniam modeliavimui bus naudojami du keitikliai, kurių parametrai pateikti 3 lentelėje. Pasirinkti realiai gaminamų 10 MHz ir 20 MHz darbinio dažnio keitiklių parametrai. Tokie darbiniai dažniai parinkti gautų rezultatų palyginimui su rezultatais, gautais atlikus modeliavimą su imersiniais nefokusuojančiais 10 MHz ir 20 MHz keitikliais.

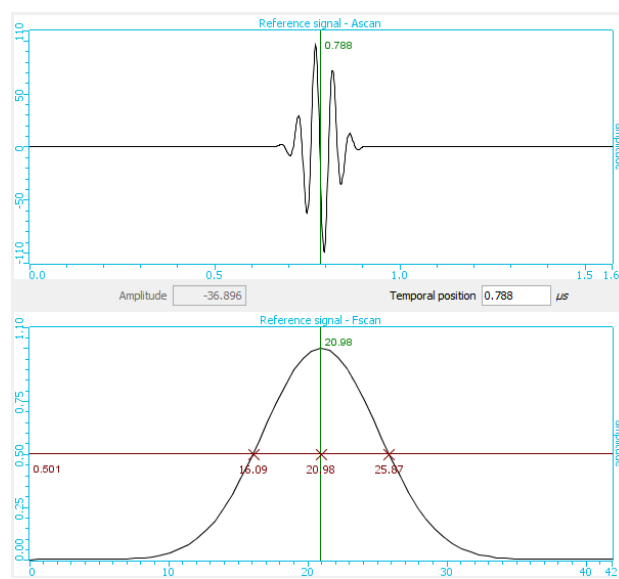
3 lentelė. Fokusuojančių imersinių keitiklių pagrindiniai parametrai

Modelis Nr.1 (10 MHz keitiklis)		Modelis Nr.2 (20 MHz keitiklis)	
Keitiklis	Olympus V327-SU-F	Keitiklis	Olympus V317-SU-F
Tipas	Imersinis, fokusuojantis	Tipas	Imersinis, fokusuojantis
Forma	Apskritiminis, vieno elemento	Forma	Apskritiminis, vieno elemento
Paviršiaus forma	Sferinis	Paviršiaus forma	Sferinis
Skersmuo	9,525 mm	Skersmuo	6,35 mm
Fokusavimo nuotolis	48,463 mm	Fokusavimo nuotolis	51,892 mm
Centrinis dažnis	10,17 MHz	Centrinis dažnis	20,98 MHz
Dažnių juostos plotis	62,39% prie -6 dB	Dažnių juostos plotis	46,56% prie -6 dB
Fazė	111°	Fazė	111°
Vandens sluoksnio storis	48,463 mm	Vandens sluoksnio storis	51,892 mm

Olympus V327-SU-F



Olympus V317-SU-F



25 pav. Imersinių fokusuojančių keitiklių generuojamų signalų parametrai „CIVA“ aplinkoje

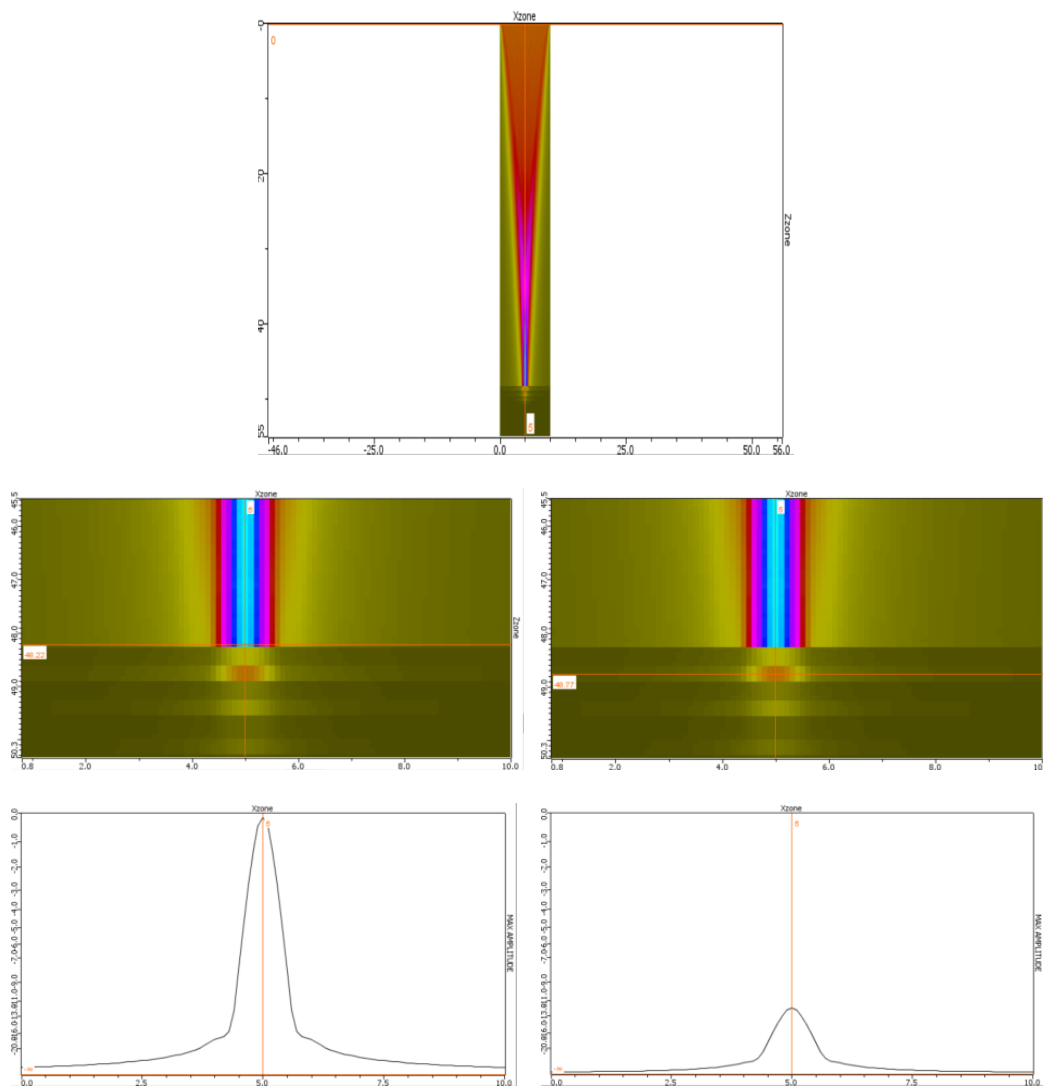
Fokuso gylis bandinyje abiem atvejais parinktas 1 mm. Tokio pasirinkimo priežastys yra kelios. Pirmiausia, pasirinktas 1 mm gylis yra beveik bandinio viduryje (bandinio storis 2,398 mm). Taip pat, iš ankstesnių rezultatų, žinome, kad ultragarso signalo didesnės amplitudės atspindžiai buvo gaunami tik nuo pirmųjų bandinio tarp sluoksninių ribų. Be to, realiomis aplinkybėmis, kitaip nei šiuo teorinio modeliavimo atveju, tyrėjas greičiausiai nežinotų kokiame tiksliai tiriamo objekto gylyje galėtų būti defektai, tad logiškas fokusavimo gylio pasirinkimas būtų ties bandinio viduriu.

Aišku, atliekant GLARE detalės tyrimą realiomis aplinkybėmis, galima būtų įvertinti ir buvusias objekto eksploatacijos sąlygas, objekto struktūrą, formą, mechanines, fizikines, chemines, bei kitas savybes, ir tikėtina, fokusavimo gyli pasirinkti tiksliau pagal tuos duomenis.

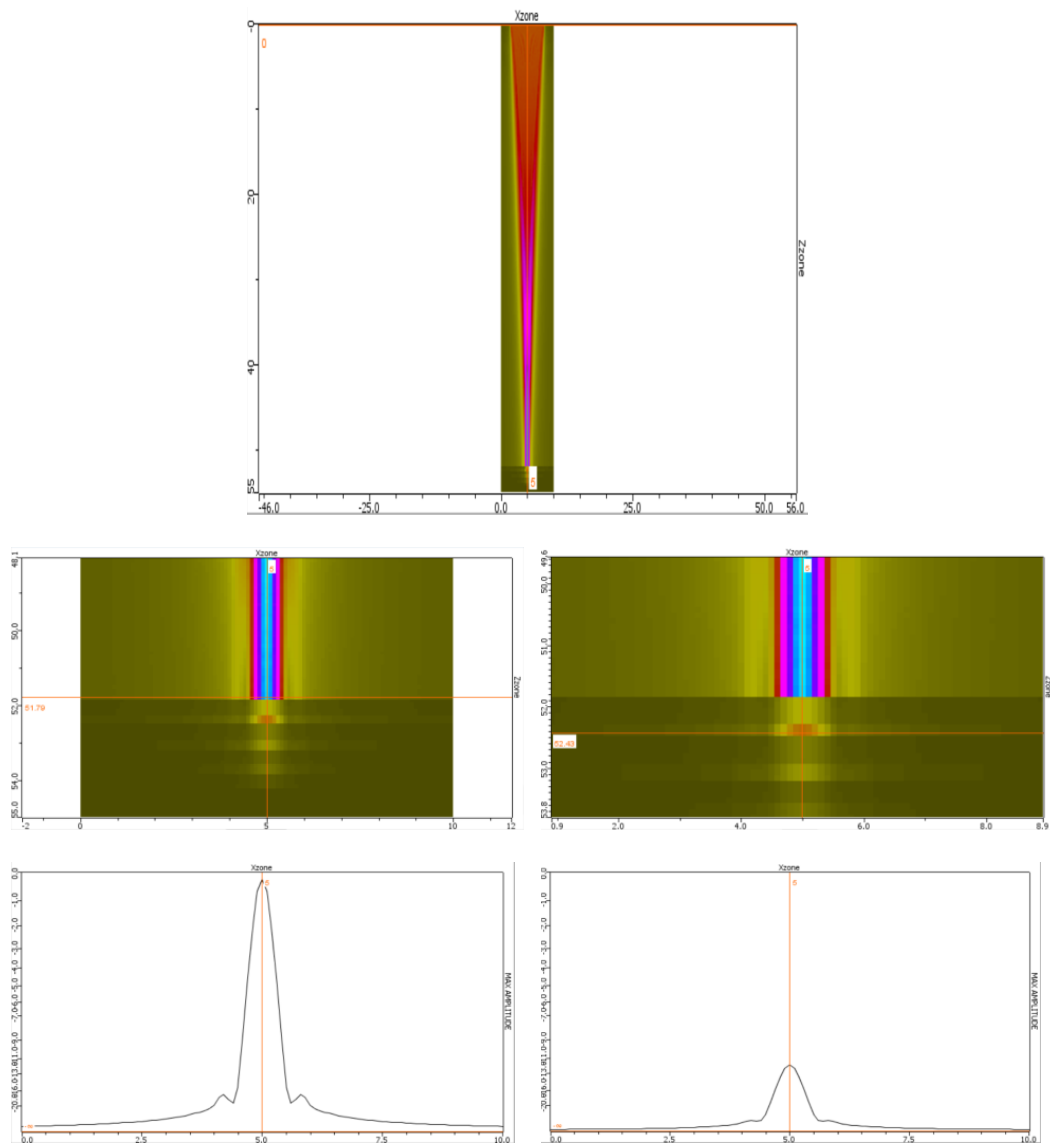
Šiuose modeliuose taip pat kaip ir ankstesniuose pasirinkta, kad keitiklis judės tik viena Y ašimi, o modelis bus dvimatis (2D). „CIVA“ programiniame pakete nurodyta, kad bandinys modelyje bus iš visų pusių supamas vandens. Keitiklis atliks 240 žingsnių, kurių kiekvieno dydis 0,25 mm.

Visi kiti duomenys (bandinio struktūra, forma ir matmenys, defektų lokalizacija bandinyje, keitiklio judėjimo nustatymai) lieka tokie patys kaip ir pirmųjų modelių atveju.

Žinant, kad keitiklio fokuso atstumas sumažėja, akustiniam laukui pereinant į kitokias akustines savybes turinčią aplinką, papildomai atliktas generuojamo akustinio lauko modeliavimas, kad įsitikinti kokiame bandinio gylyje iš tiesų laukas bus fokusuojamas. Gauti rezultatai pateikti 26 ir 27 paveiksluose.



26 pav. Fokusuojančio imersinio 10 MHz keitiklio kuriamas akustinis laukas



27 pav. Fokusuojančio imersinio 20 MHz keitiklio kuriamas akustinis laukas

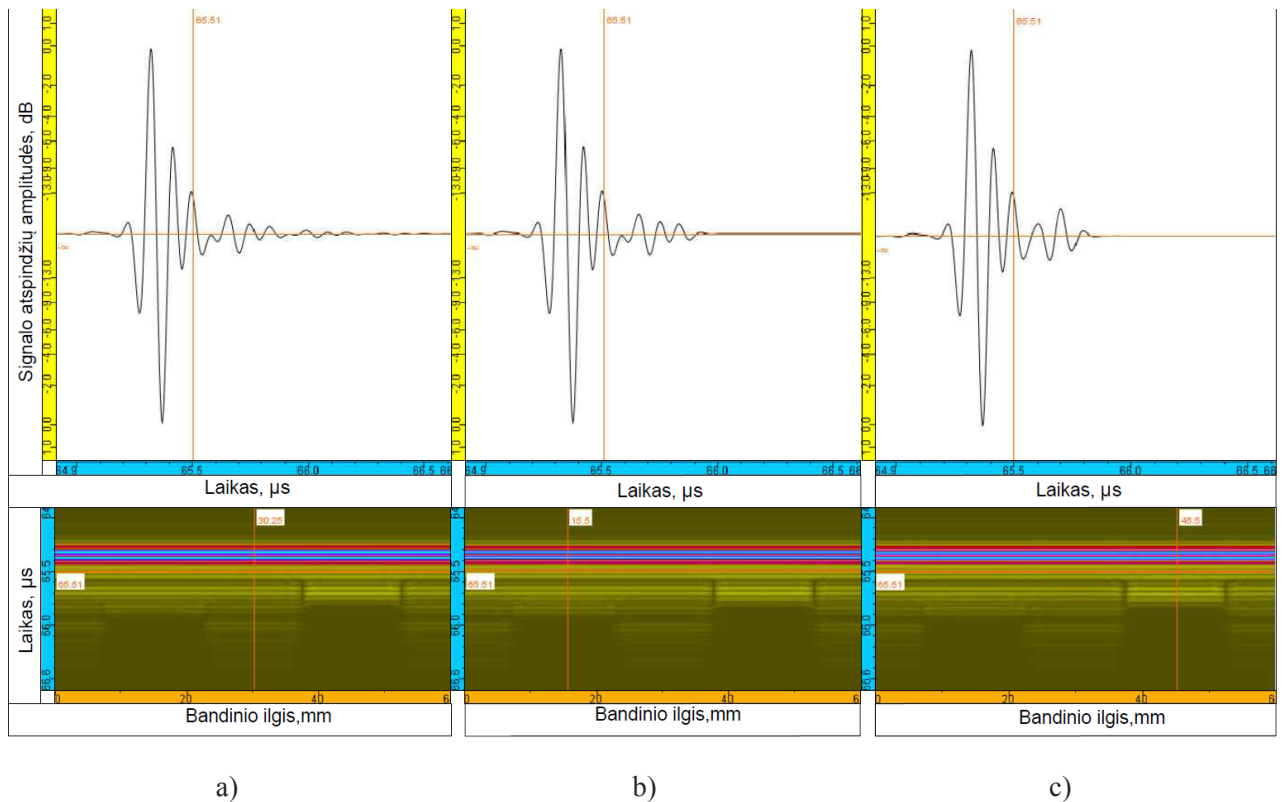
Gauti rezultatai parodė, kad didžiausia kuriamo akustinio lauko energija yra ties bandinio paviršiumi. Tuo tarpu fokuso židinyje pasislenka link bandinio paviršiaus ir lieka 0,54 mm gilyje 10 MHz keitiklio atveju. 20 MHz atveju fokuso židinyje lieka kiek giliau bandinyje – 0,63 mm. Abiem atvejais akustinio lauko energijos amplitudė fokuso židinyje yra apie 12 dB (apie 16 kartų) mažesnė nei bandinio paviršiuje.

4.2.2. Rezultatai

Modelis Nr.1 (10 MHz keitiklis)

Žemiau pateikti modeliavimo su 10 MHz fokusuojančiu keitikliu rezultatai.

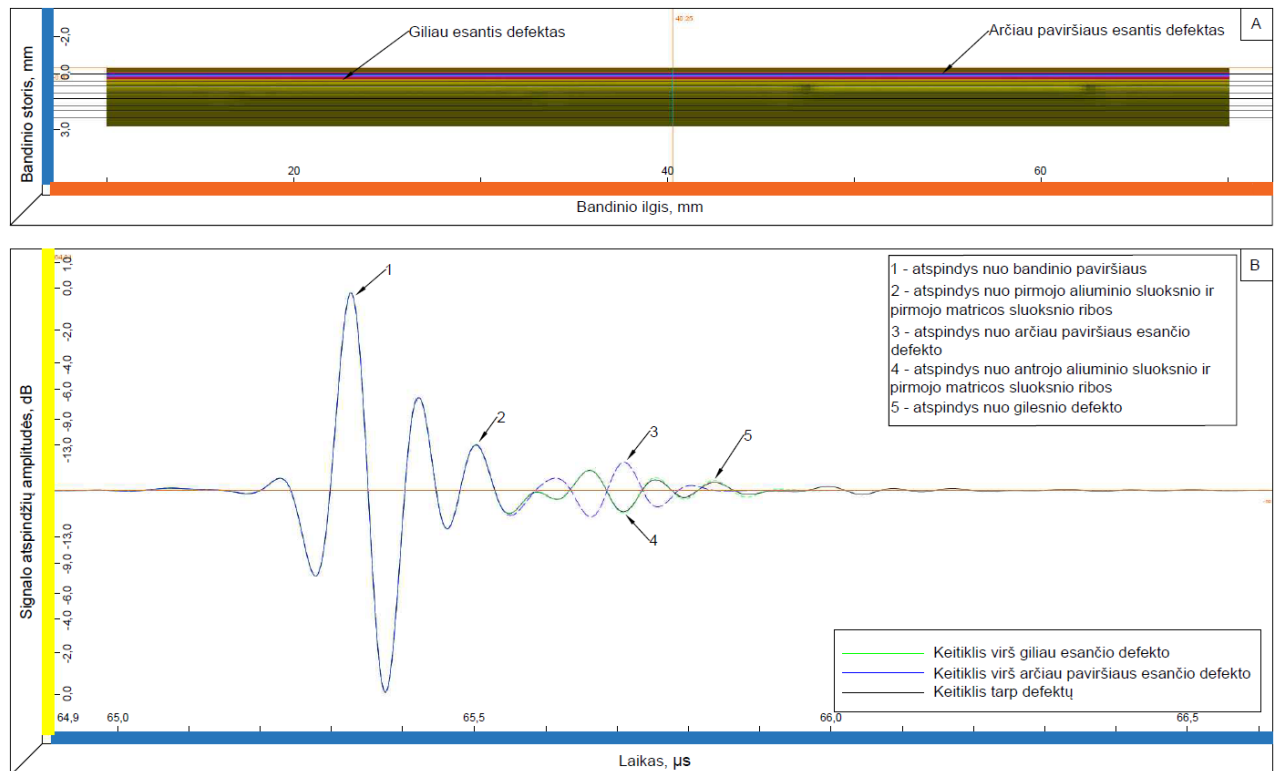
28 paveiksle palyginimui pateikti ultragarsinio signalo atspindžių vaizdai trimis atvejais – kai keitiklis virš arčiau paviršiaus, bei giliau esančių defektų bei kai keitiklis patrauktas nuo defektų. Vertikalios linijos ultragarso B vaizduose rodo keitiklio padėtį defektų atžvilgiu.



28 pav. Imersinio metodo modeliavimo su 10 MHz fokusuojančiu keitikliu A ir B vaizdai: a) keitiklis patrauktas nuo defektų, b) keitiklis virš giliau esančio defekto, c) keitiklis virš arčiau paviršiaus esančio defekto

Pirmiausia iškart matyti, kad B vaizdas yra kur kas kontrastingesnis. Galima pakankamai neblogai išskirti ir gilesnįjį defektą, kuris nefokusuojančio keitiklio atveju, praktiškai nematomas. Taip pat aiškiai matomas ir skirtingas defektų lokalizacijos gylis. Signalas slopsta tolygiau, išlaikydamas panašias impulsų amplitudes tiek neigiamoje tiek ir teigiamoje ordinačių ašies pusėse.

29 paveiksle pateiktas ultragarso B vaizdas ir bandinio pjūvis atvaizduojant jo sluoksnių struktūrą. Keitiklis B vaizdo atveju yra bandinio pakraštyje. A vaizde parodyti signalų atspindžiai keitikliui esant trijose padėtyse – virš abiejų defektų ir patrauktas nuo defektų.



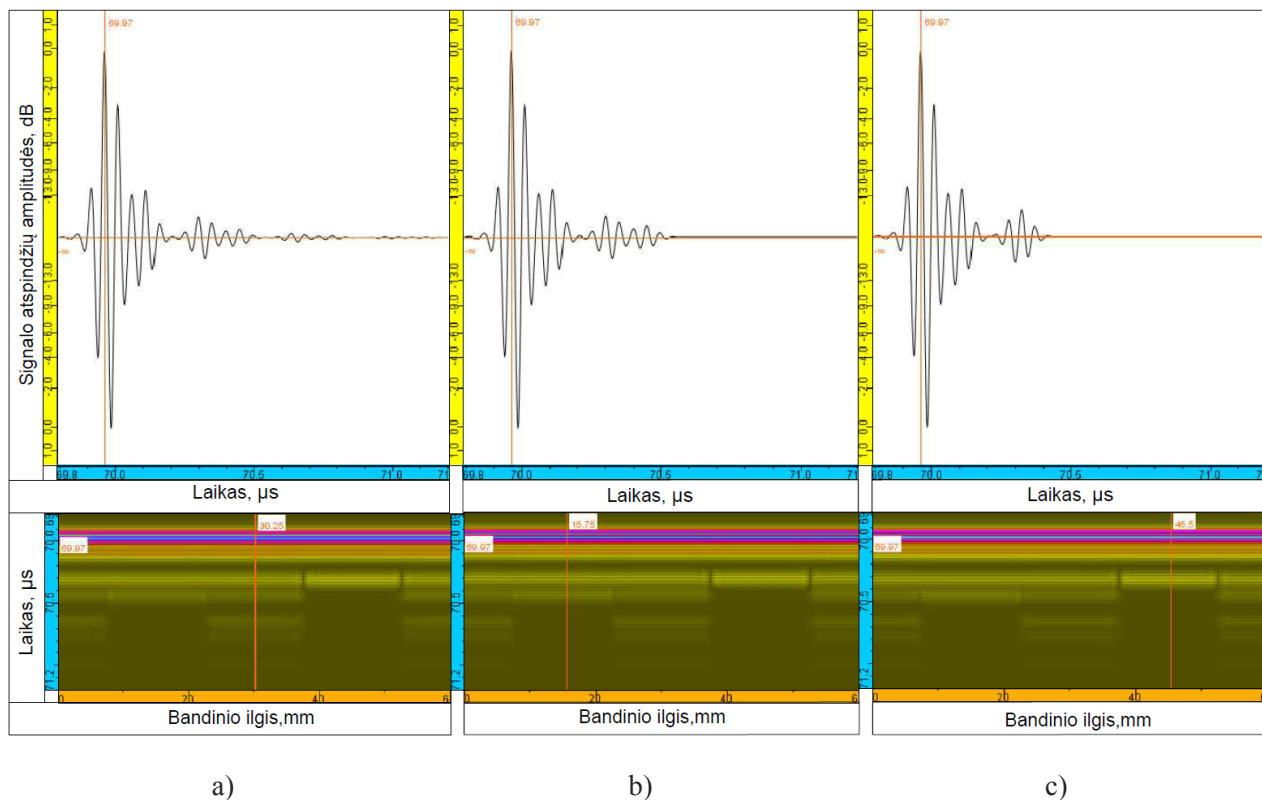
29 pav. Bandinio B vaizdas ir sluoksnių struktūra, bei atspindžių amplitudinės charakteristikos

Jei sulygintume fokusuojančio ir nefokusuojančio keitiklių amplitudines charakteristikas, pamatytume, kad fokusuojančio keitiklio atveju signalo fazė pasislinko per π . Signalų slopinimas, jam skverbiantis gilyn į bandinį, taip pat labai panašus, kaip ir nefokusuojančio keitiklio atveju, tad defektus, esančius giliau bandinio vidurio, nebūtų galima užfiksuoti.

Modelis Nr.2 (20 MHz keitiklis)

Žemiau pateikti modeliavimo su 20 MHz fokusuojančiu keitikliu rezultatai.

30 paveiksle palyginimui pateikti ultragarsinio signalo atspindžių vaizdai trimis atvejais – kai keitiklis virš abiejų defektų ir kai keitiklis patrauktas nuo defektų. Vertikalios linijos ultragarso B vaizduose rodo keitiklio padėtis defektų atžvilgiu.

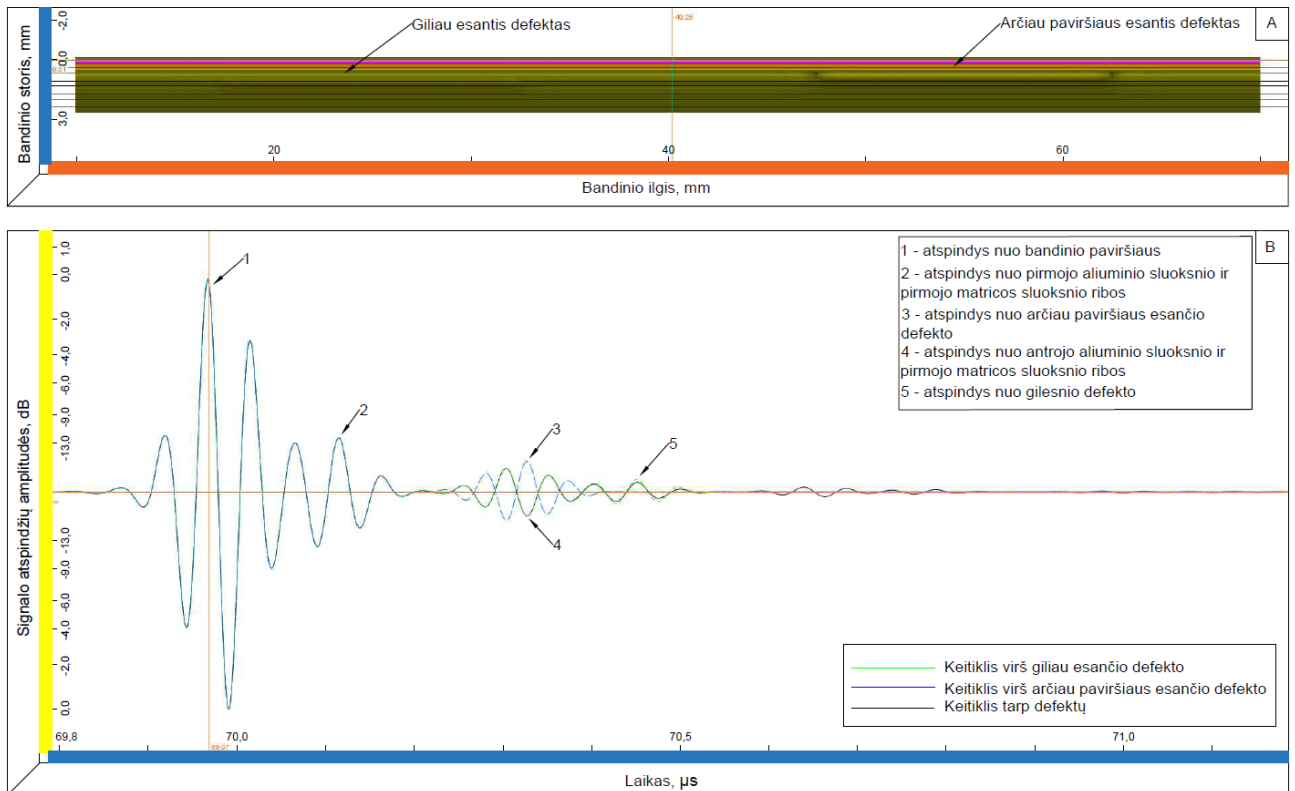


30 pav. Imersinio metodo modeliavimo su 20 MHz fokusuojančiu keitikliu A ir B vaizdai: a) keitiklis patrauktas nuo defektų, b) keitiklis virš giliau esančio defekto, c) keitiklis virš arčiau paviršiaus esančio defekto

Iš rezultatų matyti, kad B vaizdas yra dar šiek tiek kontrastingesnis nei gautas, naudojant 10 MHz fokusuojantį keitiklį, ir ženkliai kontrastingesnis nei 10 MHz nefokusuojančio keitiklio atveju.

Iš amplitudinių charakteristikų labai aiškiai matoma kaip mažėja kiekvieno atspindžio amplitudė, jam grįžtant nuo vis gilesnio sluoksnio.

31 paveiksle pateiktas ultragarso B vaizdas ir bandinio pjūvis atvaizduojant jo sluoksnių struktūrą. A vaizde parodyti signalų atspindžiai keitikliui esant trijose padėtyse – virš abiejų defektų ir patrauktas nuo defektų.



31 pav. Bandinio B vaizdas ir sluoksnių struktūra, bei atspindžių amplitudinės charakteristikos

Lyginant su 20 MHz nefokusuojančio keitiklio amplitudine charakteristika, matyti, kad fokusuojančio keitiklio signalo fazės poslinkis per π .

Atlikus aukščiau aprašytus teorinius modeliavimus ultragarsu, naudojant imersinius dviejų tipų ir skirtingų darbinių dažnių keitiklius, galima būtų padaryti sekančias išvadas. Pirmiausia, norint gauti lengviau analizuojamas amplitudines charakteristikas reikalinga naudoti bent jau 10 MHz darbinio dažnio keitiklius. Didelių skirtumų tarp A vaizdų charakterių, gautų fokusuojančiu ir nefokusuojančiu keitikliais, nėra. Pagrindinis skirtumas yra fokusuojančio keitiklio signalo fazės poslinkis per 180° . Fazės poslinkis išlieka toks pat nepriklausomai nuo darbinio dažnio.

Pagal gautas amplitudines charakteristikas matyti, kad visais atvejais defekto, esančio giliau nei bandinio viduriniai sluoksniai jau greičiausiai nepavyktų patikimai identifikuoti. Kaip parodė gauti rezultatai, jau nuo defekto, esančio ties 3-io ir 4-o sluoksnių riba, iki keitiklio sugrįžta labai mažos amplitudės atspindys, kurio energija mažai skiriasi nuo atspindžio grįžusio tiesiog nuo pačios 3 ir 4 sluoksnių ribos.

Pagrindinis fokusuojančio keitiklio privalumas prieš nefokusuojantį išryškėja pažvelgus į B vaizdus, kurie yra ženkliai kontrastingesni ir detalesni, kas leidžia tiksliau nustatyti užfiksuoto defekto matmenis. Savaiame aišku, realaus eksperimento metu, norint gauti pakankamai detalių defektų B vaizdą, reikalinga tinkamai parinkti keitiklio fokuso atstumą.

4.3. Tyrimo, naudojant fazuotas gardeles, modeliavimas

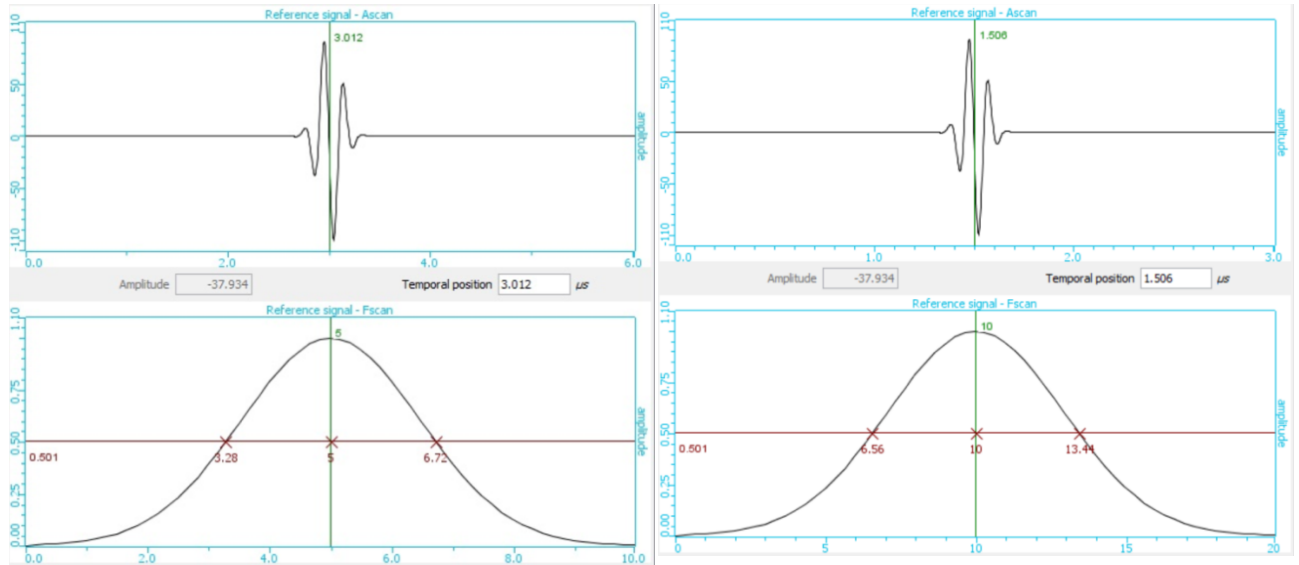
4.3.1. Modeliavimo aprašymas ir keitiklių parametrai

Fazuotos gardelės turėtų būti pranašesnės už paprastus kontaktinius ar imersinius ultragarsinius keitiklius. Pirmiausia, naudojant paprastą keitiklį, reikalinga mechaniškai keisti jo padėtį tiriamo objekto paviršiaus atžvilgiu ir įrašyti kiekvieno nuskenuoto taško duomenis bei atvaizduoti juos grafiškai. Fazuotos gardelės naudojimas leidžia skenavimą atlikti elektroniniu būdu, tokiu būdu trumpinant proceso trukmę. Be to, gardelė gali dirbti skirtingais režimais ir yra realizuojama galimybė manipuluoti ultragarso lauku naudojant tą patį vieną keitiklį, t. y. – fokusuoti skirtingame gylyje artimojoje zonoje, pasukti ultragarso lauką. Gardelės leidžia pasiekti didesnę skiriamąją gebą. Tikėtina, kad ir kompiuterinio modeliavimo rezultatai fazuotų gardelių atveju turėtų būti geri.

Buvo atlikti modeliavimai su 2 skirtingų darbinių dažnių ultragarsinėmis fazuotomis gardelėmis. Modelių aprašymams naudoti gamintojo „Olympus“ gardelių parametrai, kurie pateikti 4 lentelėje. Iš viso buvo modeliuojami 4 tyrimo gardelės variantai: 2 atvejai naudojant paprasto linijinio skenavimo režimą ir 2 atvejai naudojant linijinį skenavimą fokusuotu signalu.

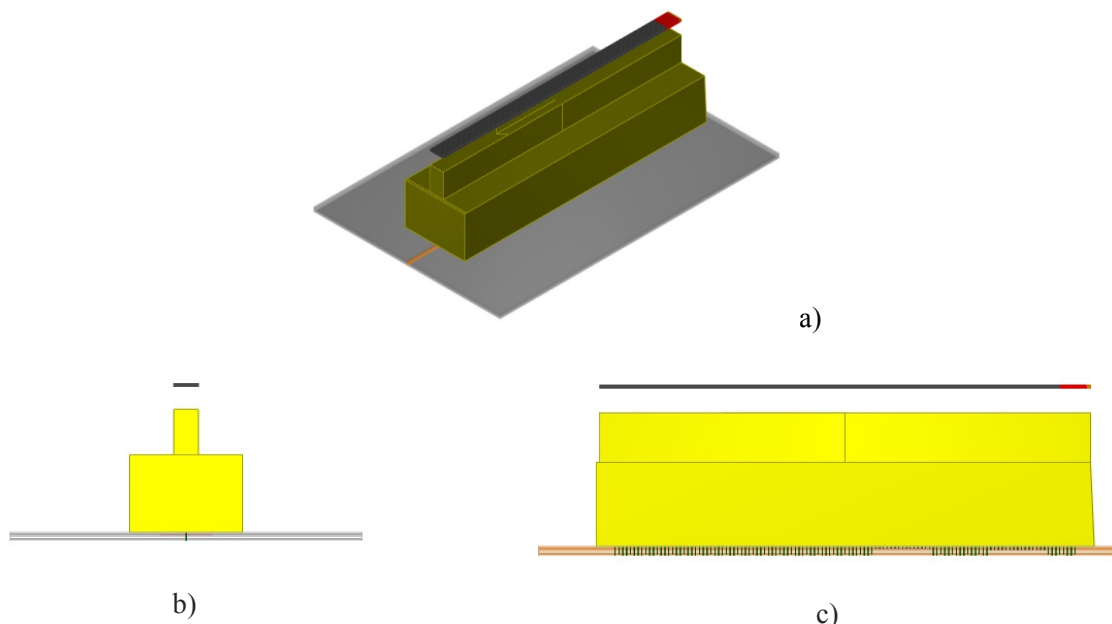
4 lentelė. Teoriniam modeliavimui pasirinktų fazuotų gardelių pagrindiniai parametrai

Modeliai Nr.1 ir Nr.3 (5 MHz keitiklis)		Modeliai Nr.2 ir Nr.4 (10 MHz keitiklis)	
Keitiklis	5L128-128x7-NW3-P-2.5-OM	Keitiklis	10L64-64x7-NW1-P-2.5-OM
Tipas	Kontaktinis, viename korpuse sumontuotas siuntiklis ir ėmiklis	Tipas	Kontaktinis, viename korpuse sumontuotas siuntiklis ir ėmiklis
Forma	Linijinis	Forma	Linijinis
Apertūros matmenys	128 mm x 7 mm	Apertūros matmenys	64 mm x 7 mm
Elementų sk.	128	Elementų sk.	64
Elemento plotis	1 mm	Elemento plotis	1 mm
Centrinis dažnis	5,21 MHz	Centrinis dažnis	9,77 MHz
Dažnių juostos plotis	72,50% prie -6 dB	Dažnių juostos plotis	63,70% prie -6 dB
Vienu metu žadinamų elementų sk.	8	Vienu metu žadinamų elementų sk.	7



32 pav. Fazuotų gardelių generuojamų signalų parametrai „CIVA“ aplinkoje

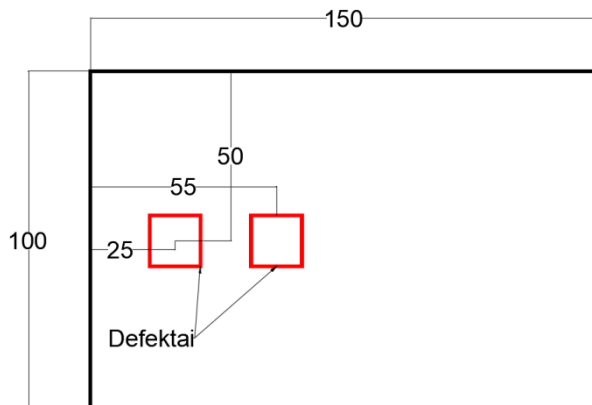
Šio tipo gardelės naudojamos su vėlinimo linijomis. Pirmu atveju vėlinimo linijos matmenys yra sekantys: ilgis 130 mm, plotis 32 mm, aukštis 22 mm. Antrojo modelio atveju vėlinimo linija yra dvigubai trumpesnė, kadangi pačios gardelės ilgis yra dvigubai trumpesnis. Vėlinimo linijos aukštis ir plotis lieka tokie patys kaip ir didesnės gardelės atveju. Bendras modeliavimo metu suprojektuotos 128 elementų gardelės su vėlinimo linija vaizdas pateiktas 33 paveiksle.



33 pav. Modelyje aprašyta 128 elementų fazuota gardelė su vėlinimo linija. Vaizdai: a) kampu, b) iš galo, c) iš šono.

Pasirinkta, kad visais atvejais fazuotos gardelės bandinį skenuos viena Y ašies kryptimi, o modeliai, kaip ir ankstesniais atvejais, bus dvimačiai (2D). Skenavimo žingsnis 0,1 mm, o pačių gardelių padėtis tiriamojo bandinio atžvilgiu nekintama.

Pasirinktų fazuotų gardelių matmenys yra gerokai didesni nei paprasto ir fokusuoto keitiklių. Taip pat reikalinga, kad gardelė visu paviršiaus plotu kontaktuotų su tiriamuoju objektu. Dėl šios priežasties bandinio forma ir matmenys šiems modeliams buvo pakoreguoti. Defektų padėtys ir gyliai išliko lygiai tekiose pat padėtyse kaip ir ankstesniuose modeliuose. Pakoreguoto bandinio iliustracija pateikta 34 paveiksle.

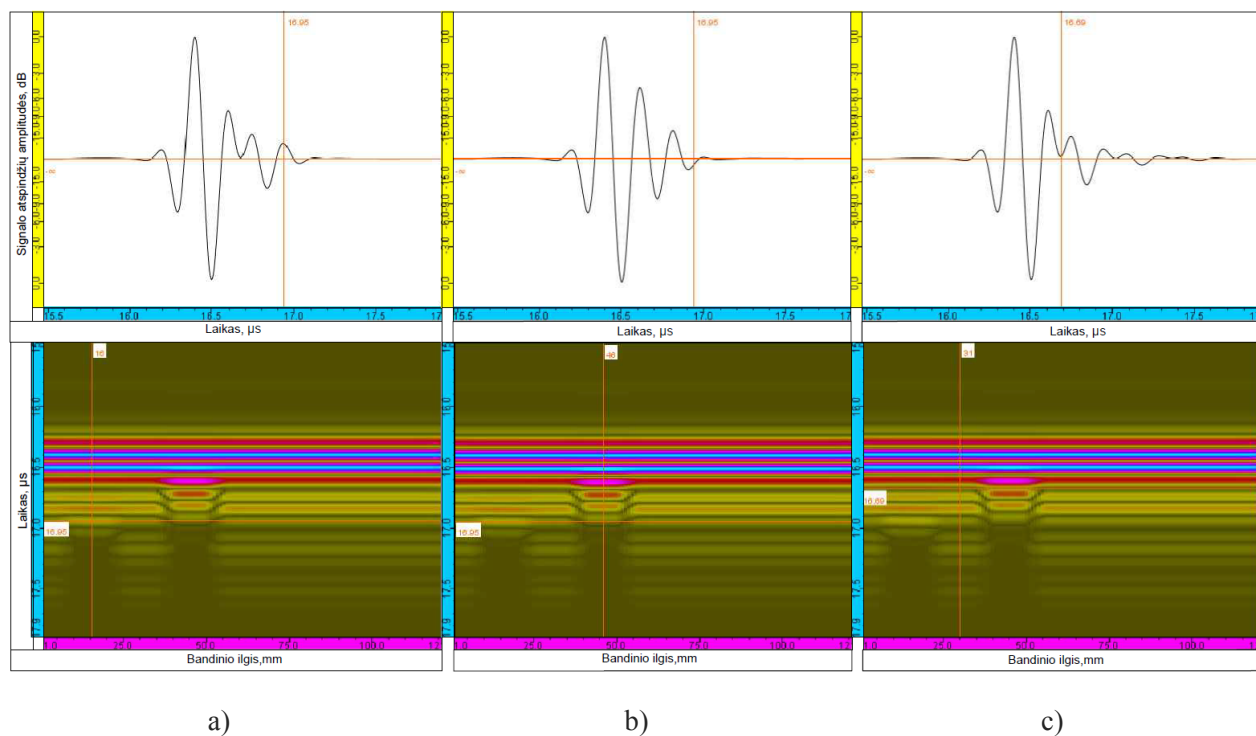


34 pav. Pakoreguoti bandinio matmenys, mm

4.3.2. Rezultatai

Modelis Nr.1 (5 MHz keitiklis, linijinis skenavimas)

Žemiau aprašyti modeliavimo rezultatai su 5 MHz darbinio dažnio gardele, dirbančia linijinio skenavimo režime.



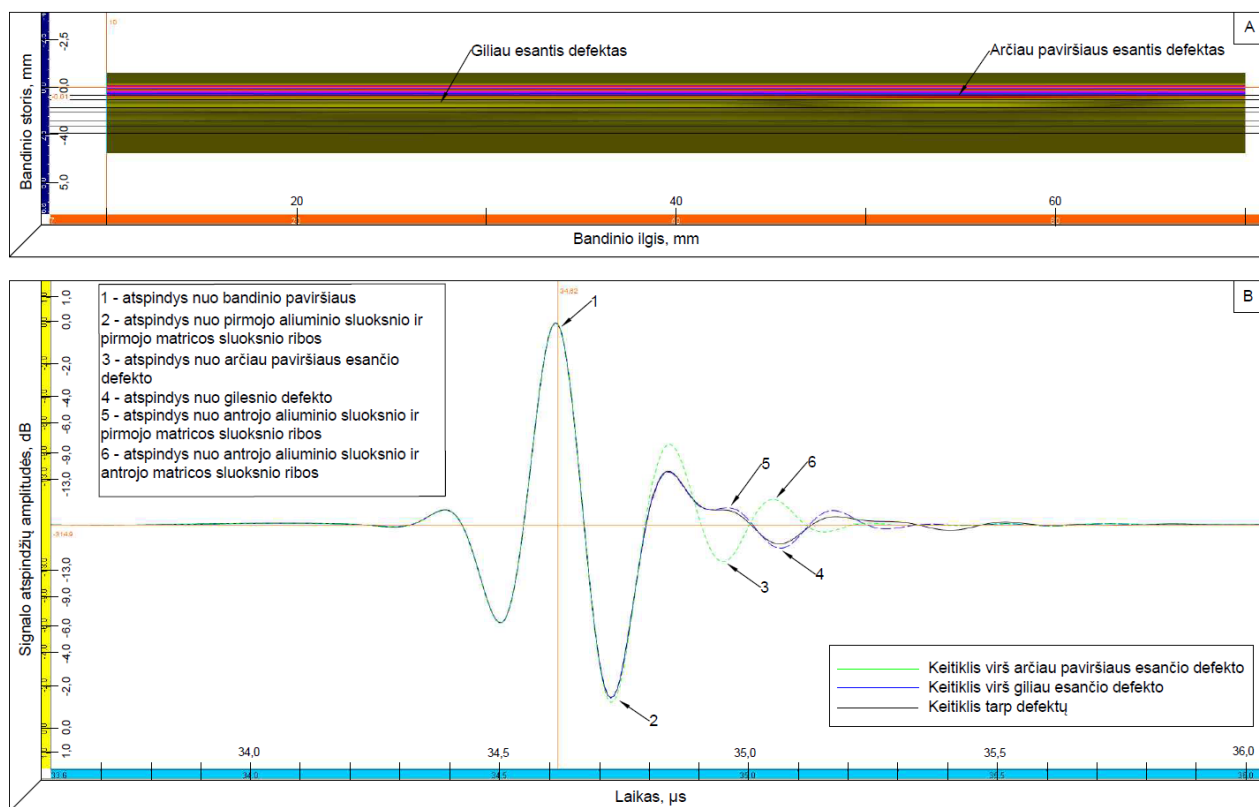
35 pav. Modeliavimo su 5 MHz fazuota gardele A ir B vaizdai: a) keitiklis virš giliau esančio defekto, b) keitiklis virš arčiau paviršiaus esančio defekto, c) keitiklis skenuoja toliau nuo defektų

35 paveiksle palyginimui pateikti ultragarso signalo atspindžių vaizdai trimis atvejais – kai keitiklis virš arčiau paviršiaus ir giliau esančio defektų, bei kai keitiklis skenuoja toliau nuo defektų. Vertikalios linijos ultragarso B vaizduose rodo keitiklio padėtis defektų atžvilgiu.

Pirmiausia reikėtų paminėti, kad nors modelyje apsirašytos fazuotos gardelės darbo dažnis yra 5 MHz, tačiau gautų B vaizdų kokybė iš esmės yra geresnė nei visų B vaizdų, gautų naudojant paprastus imersinius ultragarso keitiklius.

Jei pažiūrėtume į ultragarso signalo atspindžių kreives, matysime panašią situaciją, kaip ir visais ankstesniais atvejais. Arčiau paviršiaus esantis defektas atspindi didesnės amplitudės signalą, kai tuo tarpu gilesnis defektas jau yra sunkiau užfiksuojamas. Dėl geresnės B vaizdų kokybės labai aiškiai matomas ir defektų skirtingas gylis.

36 paveiksle pateiktas ultragarso B vaizdas ir bandinio pjūvis atvaizduojant jo sluoksnių struktūrą. Vertikali linija rodo fazuotos gardelės skenavimo momentą virš bandinio.



36 pav. Bandinio B vaizdas ir sluoksnių struktūra, bei atspindžių amplitudinės charakteristikos

Pažvelgus į 20 paveikslėlį, kuriame pateiktos 5 MHz darbinio dažnio imersinio keitiklio atspindžių kreivės ir palyginus jį su 36 paveikslėliu, galima pamatyti akivaizdžius kreivių charakterių panašumus. Skirtumas iš esmės yra tik signalo atspindžių amplitudėse. Fazuotos gardelės atveju atspindžių amplitudės yra didesnės, dėl ko galima gauti kontrastingesnius B vaizdus. Tikėtina, kad galima būtų gauti didesnės amplitudės atspindžius nuo kiek giliau esančios tarp sluoksnių ribos bandinyje.

Taip pat galima pastebėti nežymiai besiskiriančius signalų fazės poslinkius, nors darbiniai keitiklių dažniai ir yra vienodi. Prielaida, dėl ko skiriasi signalų fazių poslinkiai galėtų būti ta, kad imersinio

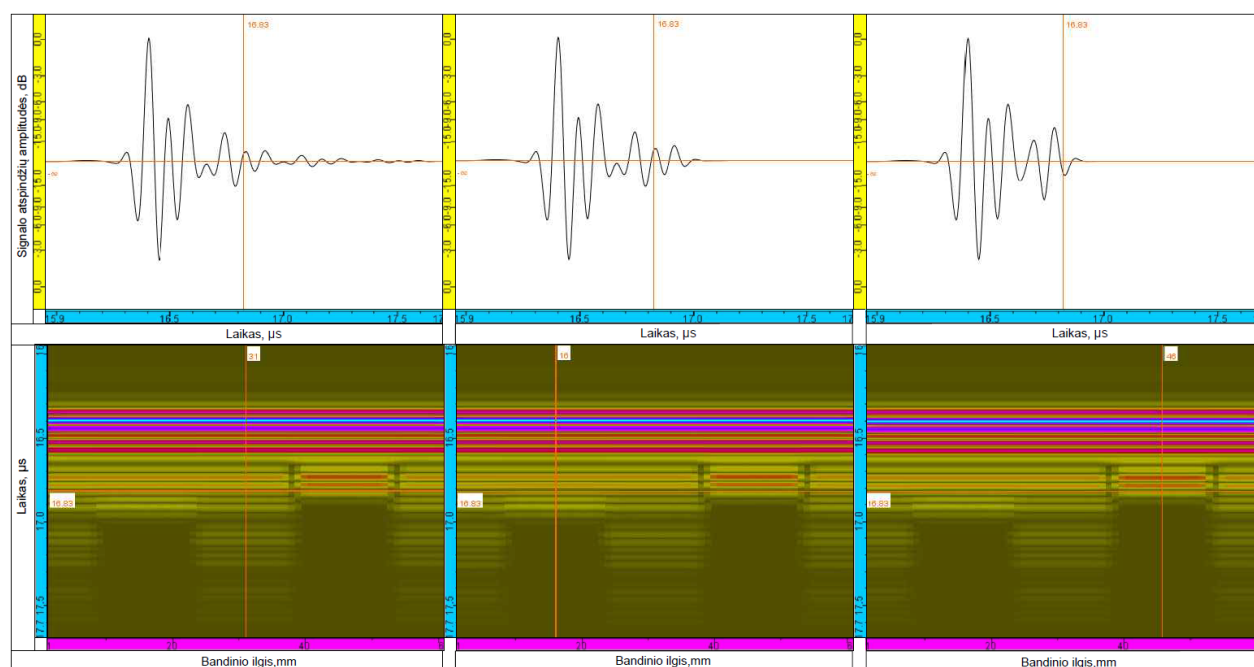
metodo atveju, pradinis signalas dar nusklinda tam tikrą atstumą vandeniui, o tuo tarpu, tiriant fazuota gardele, signalas iš keitiklio beveik iškart patenka į aliuminį (jei nevertinsime gelio ar vandens sluoksnio, naudojamo gardelės kontakto su bandinio paviršiumi pagerinimui).

Taigi, remiantis gautais teoriniais rezultatais, galima būtų daryti išvadą, jog pagrindinis 5 MHz dažnio gardelės panaudojimo privalumas prieš imersinį 5 MHz dažnio keitiklį yra gaunami kontrastingesni, geresnės kokybės B vaizdai. Defektų aptikimo gylis, signalo slopinimo lygis daugiasluoksnėse plonose struktūrose praktiškai nesiskiria.

Modelis Nr.2 (10 MHz keitiklis, linijinis skenavimas)

Žemiau pateikti modeliavimo rezultatai su 10 MHz darbinio dažnio gardele, dirbančia linijinio skenavimo režime.

37 paveiksle palyginimui pateikti ultragarso signalo atspindžių vaizdai trimis atvejais – kai keitiklis virš arčiau paviršiaus ir giliau esančio defektų, bei kai keitiklis skenuoja toliau nuo defektų. Vertikalios linijos ultragarso B vaizduose rodo keitiklio padėtis defektų atžvilgiu.



a)

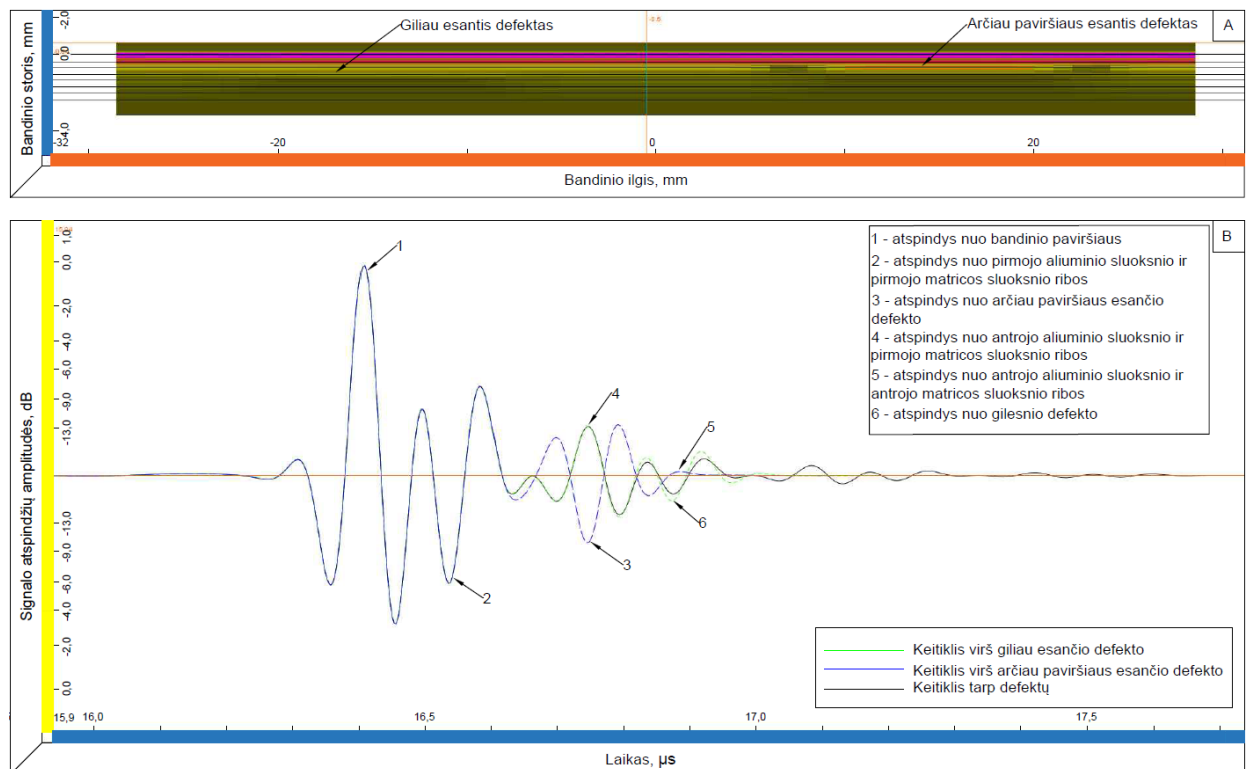
b)

c)

37 pav. Modeliavimo su 10 MHz fazuota gardele A ir B vaizdai: a) keitiklis skenuoja toliau nuo defektų, b) keitiklis virš giliau esančio defekto, c) keitiklis virš arčiau paviršiaus esančio defekto

Lyginant B vaizdus gautus naudojant 5 MHz ir 10 MHz fazuotas gardeles galima pastebėti, kad 10 MHz gardelės atveju vaizdo kokybė yra geresnė, galima tiksliau įvertinti defektų matmenis.

38 paveiksle pateiktas ultragarso B vaizdas ir bandinio pjūvis atvaizduojant jo sluoksnių struktūrą. Šiuo atveju skenavimas vyksta toliau nuo defektų.



38 pav. Bandinio B vaizdas ir sluoksnių struktūra, bei atspindžių amplitudinės charakteristikos

Tarpusavyje lyginant rezultatus, gautus panaudojus 5 MHz darbinio dažnio imersinį keitiklį ir fazuotą gardelę, labai didelių skirtumų nepastebėta, tačiau panaudojus 10 MHz fazuotą gardelę ir palyginus gautus rezultatus su 22 paveiksle pateiktais 10 MHz imersinio keitiklio rezultatais, galima pastebėti jau kur kas ryškesnius skirtumus. Pagrindinis skirtumas yra labiau besiskiriančios atspindžių amplitudės, dėl ko jau turėtų būti didesnė tikimybė aptikti giliau esančius defektus, bei diferencijuoti juos pagal gylį. Be kita ko, turimas jau gerokai geresnės kokybės B vaizdas. Taip pat matyti, kad ultragarso signalas patekęs į defektą yra beveik visai nuo jo atspindimas. Ši aplinkybė turėtų būti viena iš priežasčių dėl ko gaunami didesnių amplitudžių atspindžiai. Atveju su 5 MHz darbinio dažnio gardele dar galima pastebėti šioki tokį signalo prasiskverbimą pro defektą. Aišku, toks likutinis signalas jokios praktinės reikšmės vis tiek neturi.

Lyginti rezultatus, gautus naudojant 10 MHz fazuotą gardelę su rezultatais, gautais panaudojus 20 MHz imersinį keitiklį, gana sudėtinga, kadangi dėl dvigubai besiskiriančių darbinio dažnių, skiriasi ir pačių atspindžių kreivių charakteriai. Akivaizdu tas, kad kaip ir prieš tai aprašytais atvejais, taip ir šiuo atveju, panaudojus fazuotą gardelę, gaunamas geresnės kokybės B vaizdas, bei didesnių amplitudžių atspindžiai. Taip pat, aiškiai matomas ir toks pat signalo „užgesimas“ defektuose.

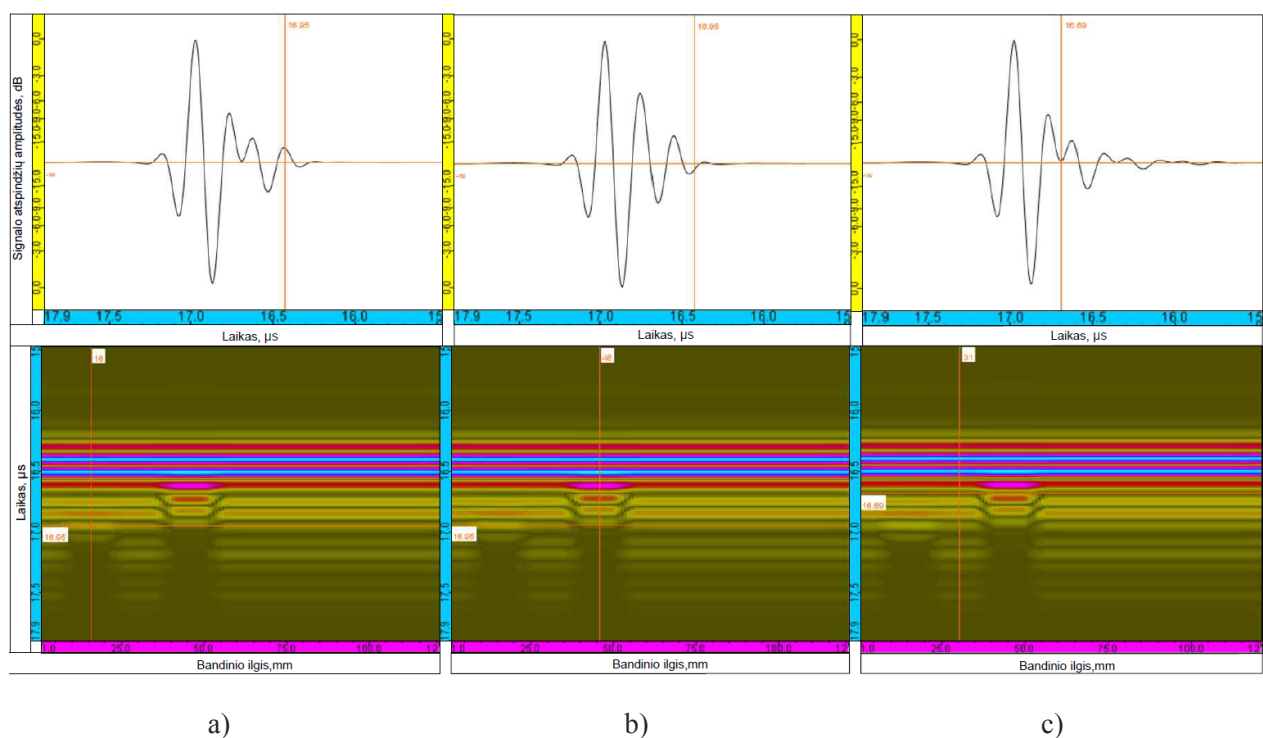
Kalbėti apie defektų tinkamą aptikimą prie bandinio dugno nėra prasmės, kadangi signalas ir naudojant 10 MHz fazuotą gardelę yra smarkiai slopinamas jam sklindant per keletą skirtingos medžiagos sluoksnių. Tiesa, reikia paminėti, kad su 10 MHz darbinio dažnio gardele defektus būtų galima aptikti kiek giliau, nei naudojant kitus prieš tai aprašytus keitiklius.

Modelis Nr.3 (5 MHz keitiklis, linijinis skenavimas fokusuotu spinduliu)

39 paveiksle palyginimui pateikti ultragarso signalo atspindžių vaizdai trimis atvejais – kai keitiklis virš arčiau paviršiaus, bei giliau esančio defektų, ir kai keitiklis skenuoja toliau nuo defektų. Vertikalios linijos ultragarso B vaizduose rodo keitiklio padėtis defektų atžvilgiu.

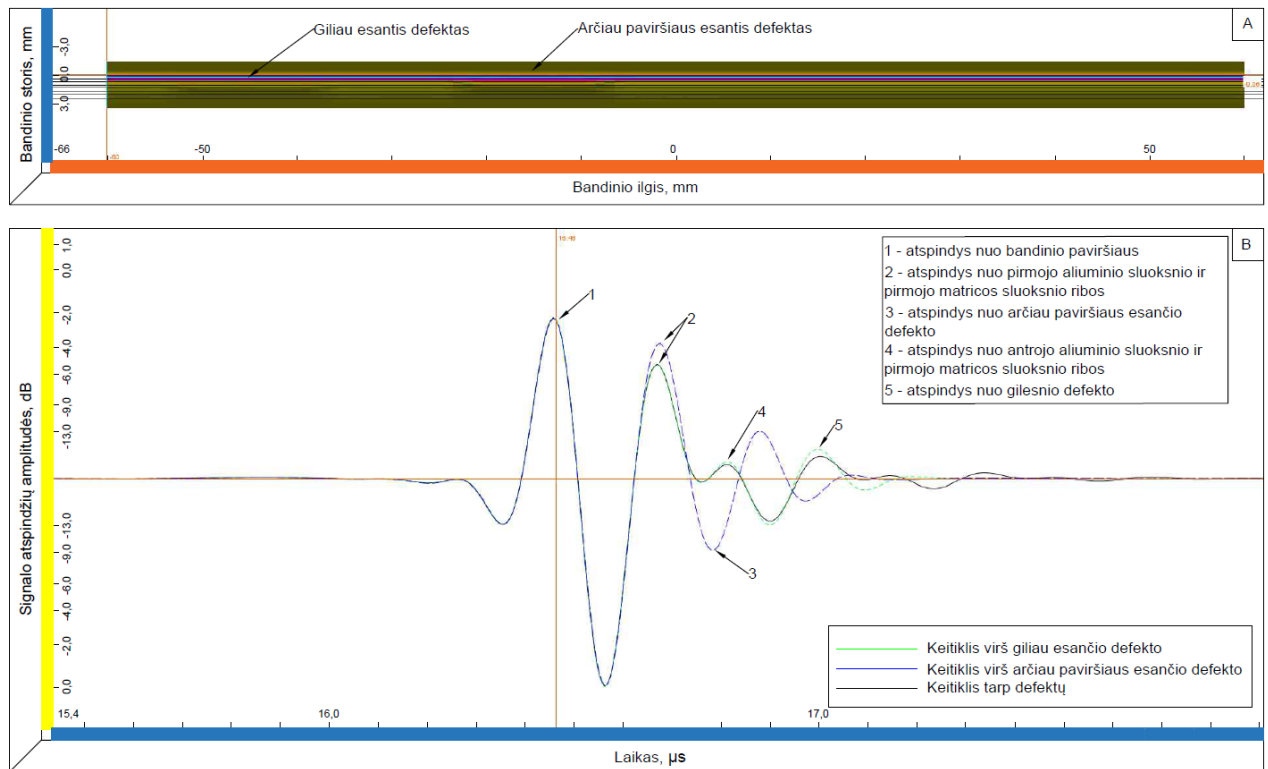
Pirmiausia reikėtų paminėti, kad 5 MHz fazuotos gardelės, dirbančios paprastame linijinio skenavimo režime, ir gardelės, dirbančios fokusuotu signalu, gautų B vaizdų kokybė iš esmės yra vienoda.

Jei pažiūrėtume į ultragarso signalo atspindžių kreives, matysime panašią situaciją, kaip ir visais ankstesniais atvejais. Atspindys nuo arčiau paviršiaus esančio defekto yra didesnės amplitudės, nei atspindys nuo gilesnio defekto. Dėl geresnės B vaizdų kokybės labai aiškiai matomas ir defektų skirtingas gylis.



39 pav. Modeliavimo su 5 MHz fazuota gardele A ir B vaizdai. Gardelė dirba linijinio skenavimo režime ir fokusuoja signalą: a) keitiklis virš giliau esančio defekto, b) keitiklis virš arčiau paviršiaus esančio defekto, c) keitiklis skenuoja toliau nuo defektų

40 paveiksle pateiktas ultragarso B vaizdas ir bandinio pjūvis atvaizduojant jo sluoksnių struktūrą. Vertikali linija rodo fazuotos gardelės skenavimo momentą virš bandinio.



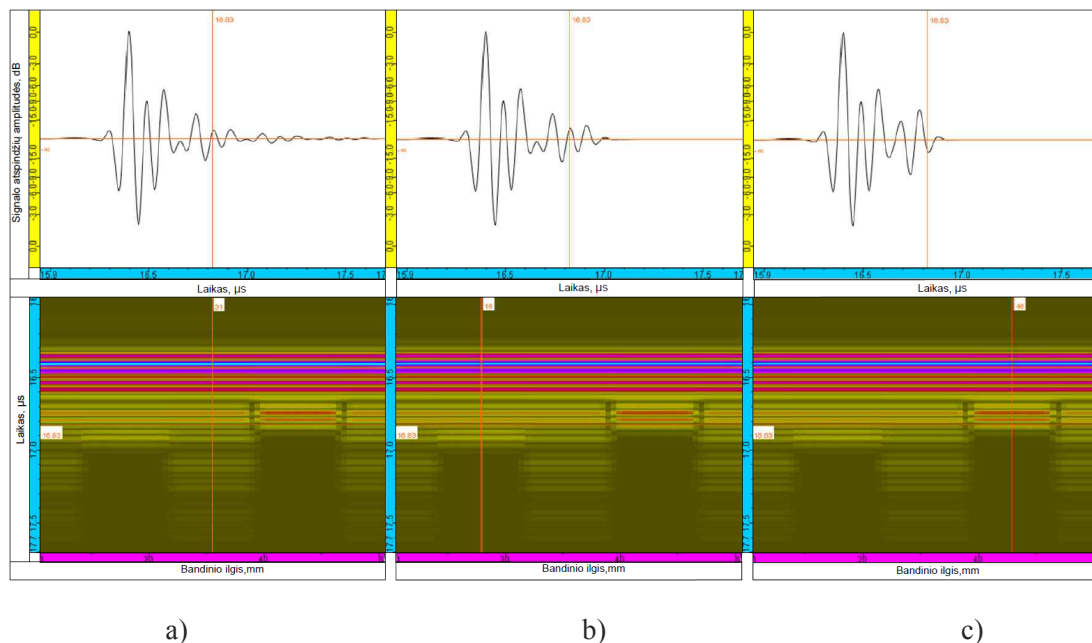
40 pav. Bandinio B vaizdas ir sluoksnių struktūra, bei atspindžių amplitudinės charakteristikos

Pagrindinis skirtumas nuo nefokusuojančių signalu dirbančios 5 MHz darbinio dažnio fazuotos gardelės yra gautų atspindžių amplitudžių lygyje. Fokusuotu signalu gaunami atspindžiai yra gerokai mažesnių amplitudžių.

Signalų slopinimo lygis ir defektų aptikimo gylis daugiasluoksnėse plonose struktūrose, lieka praktiškai toks pat.

Modelis Nr.4 (10 MHz keitiklis, linijinis skenavimas fokusuotu spinduliu)

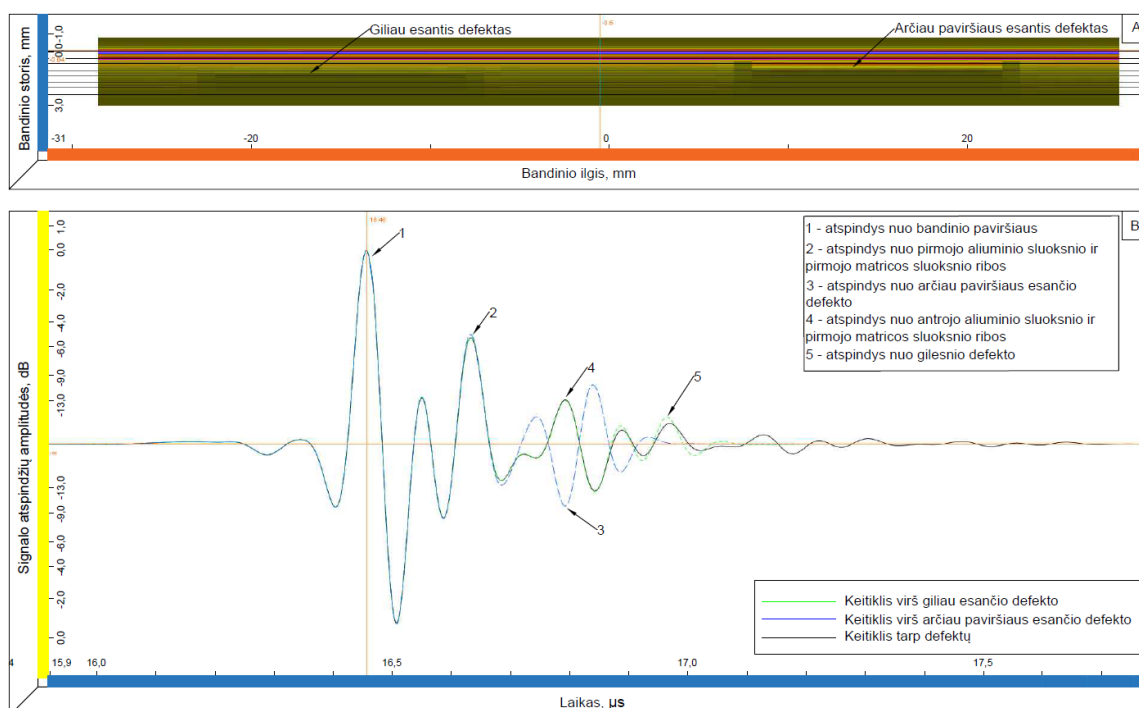
41 paveiksle palyginimui pateikti ultragarso signalo atspindžių vaizdai trimis atvejais – kai keitiklis virš arčiau paviršiaus, bei giliau esančio defektų, ir kai keitiklis skenuoja toliau nuo defektų. Vertikalios linijos ultragarso B vaizduose rodo keitiklio padėtis defektų atžvilgiu.



41 pav. Modeliavimo su 10 MHz fazuota gardelė A ir B vaizdai. Gardelė dirba linijinio skenavimo režime ir fokusuoja signalą: a) keitiklis skenuoja toliau nuo defektų, b) keitiklis virš giliau esančio defekto, c) keitiklis virš arčiau paviršiaus esančio defekto

Lyginant visais atvejais gautus B vaizdus, naudojant 5 MHz ir 10 MHz fazuotas gardeles, galima pastebėti, kad 10 MHz gardelės atveju vaizdo kokybė yra geresnė. Matyti, kad defektų matmenys (ypač defekto arčiau paviršiaus) yra artimi sumodeliuotiems, pats vaizdas yra dar kontrastingesnis.

42 paveiksle pateiktas ultragarso B vaizdas ir bandinio pjūvis atvaizduojant jo sluoksnių struktūrą. Vertikali linija rodo fazuotos gardelės skenavimo momentą virš bandinio. Šiuo atveju skenavimas vyksta toliau nuo defektų.



42 pav. Bandinio B vaizdas ir sluoksnių struktūra, bei atspindžių amplitudinės charakteristikos

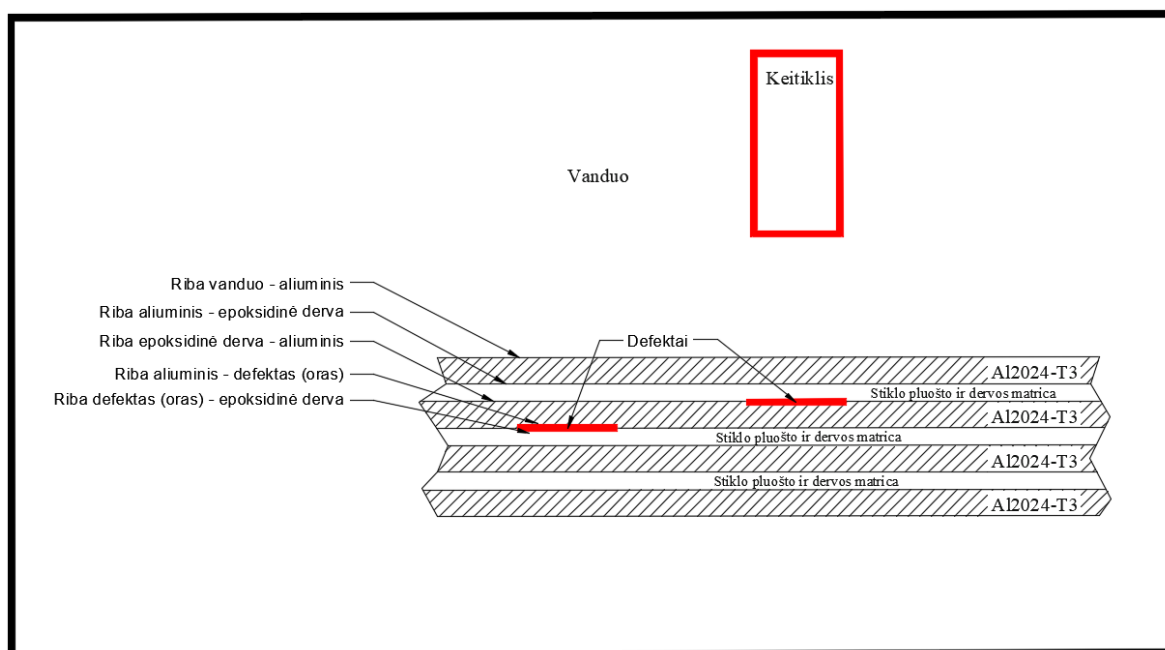
Lyginant fokusuotos ir nefokusuotos 10 MHz darbinio dažnio fazuotų gardelių modeliavimo rezultatus didelių skirtumų nepastebėta. Pagrindinis skirtumas, kaip ir 5 MHz dažnio gardelių atveju, yra atspindžių amplitudžių skirtumas. Fokusuoto gardelės signalo atspindžių amplitudės yra ženkliai mažesnės nei nefokusuoto signalo.

Jei 10 MHz fokusuojančią gardelę palygintume su to paties dažnio fokusuojančiu imersiniu keitikliu, tai pamatysime, kad ultragarso signalo atspindžių amplitudės yra ženkliai didesnės gaunamos panaudojus fazuotą gardelę.

Visi modeliuoti atvejai parodė, kad kalbėti apie defektų tinkamą aptikimą prie bandinio dugno nėra prasmės, kadangi signalas visais atvejais yra smarkiai slopinamas jam sklindant per keletą plonų skirtingos medžiagos sluoksnių. Parinkus tinkamą keitiklį, galima būtų aptikti defektus, lokalizuotus apytiksliai iki nagrinėtos struktūros vidurinių sluoksnių.

4.4. Gautų rezultatų analizė

Dažniausiai pasitaikantys defektai kompozitinėse medžiagose – tai delaminacijos ar atsiklijavimai, kurie sukuria tuštumas, į kurias vienaip ar kitaip patenka oras (ar kitos rūšies dujos). Sumodeliuotame bandinyje tuomet galima sužymėti ribas tarp bandinį sudarančių skirtingos medžiagos sluoksnių susiliečiančių paviršių, kaip parodyta 43 paveiksle. Žinome, kad bandinio matrica sudaryta iš dviejų pagrindinių skirtingų medžiagų – stiklo ir epoksidinės dervos. Supaprastinimui dervą traktuosime kaip vieną homogenišką medžiagą, neišskiriant jos gamybai naudojamų polimerų rūšių, rišiklių, kietiklių, adheziją gerinančių ir galimai dar kitų priedų. Taip pat priimsime sąlygą, kad su aliuminio paviršiumi ribojasi tik epoksidinė derva, o stiklo pluoštas yra „užrakintas“ dervoje ir tiesioginio kontakto su aliuminio sluoksniais neturi. Taip pat kompiuterinio modeliavimo sąlygose yra nurodyta, kad sumodeliuotame bandinyje stiklo pluošto dalis matricoje sudaro 2,5% viso matricos tūrio, tad supaprastinimui (nors tai ir ne visai teisinga) galima būtų laikyti, kad ultragarso signalo sklidimui matricoje stiklas įtakos neturi.



43 pav. Ribos tarp skirtingos medžiagos sluoksnių bandinyje

Taipogi yra žinomos ir visų bandinį sudarančių medžiagų kai kurios akustinės savybės, kurios pateiktos 5 lentelėje.

5 lentelė. Bandinį sudarančių medžiagų savybės

Medžiaga	Išilginės garso bangos greitis, cm/μs	Tankis, g/cm ³	Akustinė varža, g/cm ² -s x 10 ⁵
Oras, 20 °C	0,0344	0,0012	0,0004
Vanduo, 20 °C	0,148	1	1,483
Epoksidinė derva	0,3	1,3	3,9
Aliuminis	0,637	2,77	17,6
Stiklas	0,571	2,4 – 2,8	14,5

Iš turimų duomenų matome, kad aliuminio akustinė varža yra keliomis eilėmis didesnė nei oro ir keliolika kartų didesnė nei vandens ir epoksidinės dervos. Dėl šios priežasties jau pačiame pirmame etape, kai ultragarso signalas krinta į pirmojo aliuminio sluoksnio ir vandens ribą, labai didelė dalis energijos yra atspindima atgal į vandenį, tuo pačiu ir į keitiklį. Iš vienos pusės tas būtų gerai tiriant kažkokį vienasluoksnį objektą, tačiau šiuo atveju tai nėra gerai, kadangi tiriamas objektas turi daug sluoksniu ir defektai gali būti ne pačiame pirmame sluoksnyje.

Pasinaudojus atspindžio ir praėjimo koeficientų formulėmis, galima apskaičiuoti nuo tokio bandinio paviršiaus atspindimą ir praėjusią kritusio signalo energijos dalis.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$T = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$T + R \approx 1$$

čia:

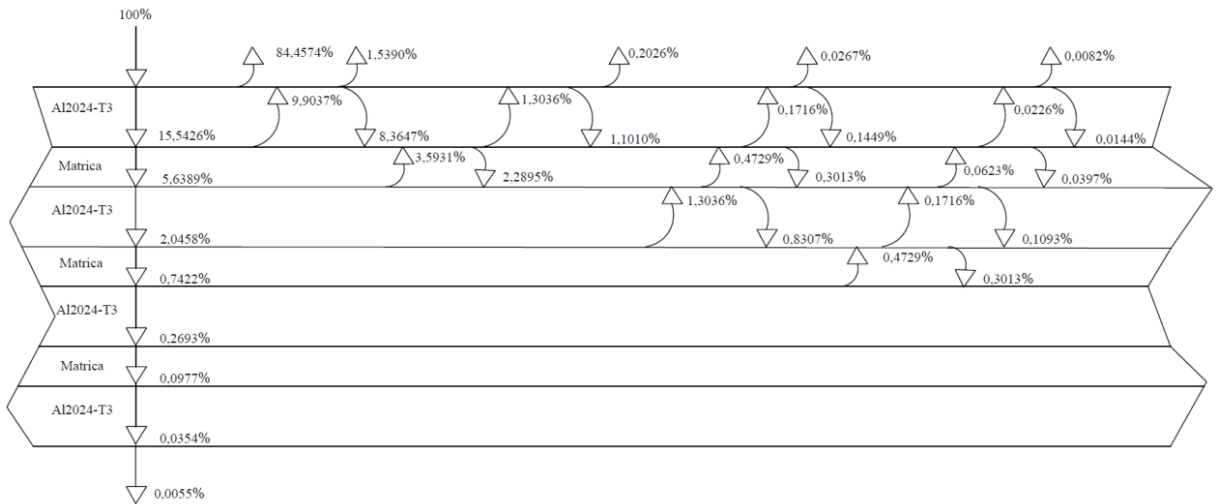
R – atspindžio koeficientas;

T – praėjimo koeficientas;

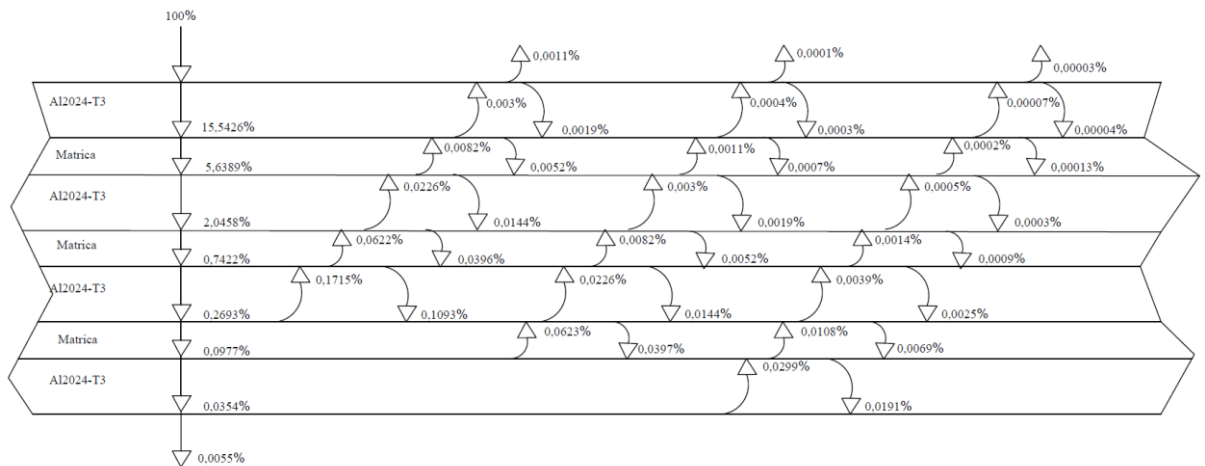
Z1 ir Z2 – atitinkamai pirmos (iš kurios sklinda energija) ir antros (į kurią sklinda energija) medžiagos akustinės varžos.

Panaudojus 5 lentelės duomenis, galima nesunkiai paskaičiuoti kad 84,46 % visos kritusios į bandinio paviršių (aliuminį) energijos bus atspindima atgal į vandenį.

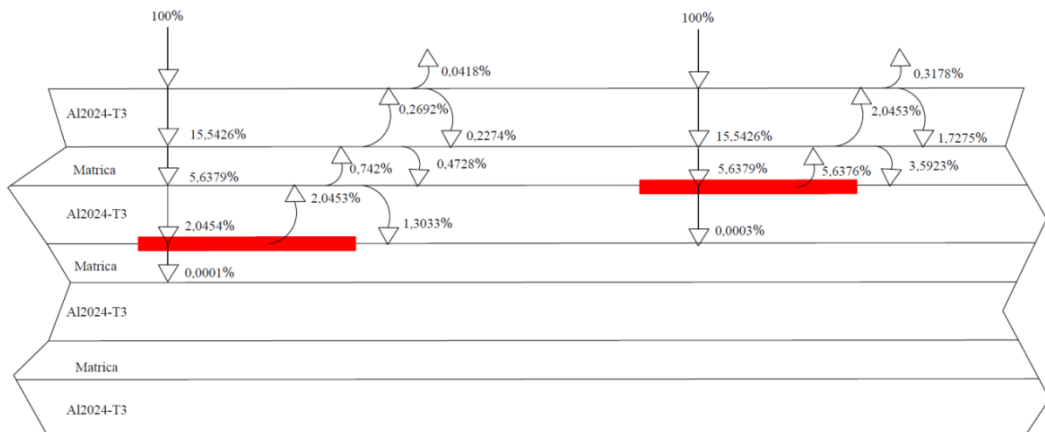
Atitinkamai nesunku paskaičiuoti, kad praėjusios į bandinį energijos dalis bus apie 15,54 %. Suprantama, kad nuo bandinio paviršiaus praėjusios energijos dalis bus vis atspindima nuo kiekvienos sekančios ribos tarp aliuminio ir matricos sluoksnių. Atlikus skaičiavimus pagal atspindžio ir praėjimo koeficientų formules, gauti rezultatai, parodantys, kokia dalis energijos, kritusios į bandinį, pasiekia skirtingus bandinio sluoksnius ir galiausiai kiek tos energijos nuo kiekvieno sluoksnio grįžta atgal į bandinio paviršių ir gali (arba jau ne) būti užfiksuota ultragarsiniu keitikliu. Gauti rezultatai pateikti 44 - 46 paveiksluose.



44 pav. Akustinės energijos kiekio dalys, signalui prasiskverbiant į bandinį ir grįžtant nuo pirmųjų 5 tarp sluoksnių ribų



45 pav. Akustinės energijos kiekio dalys, signalui prasiskverbiant į bandinį ir grįžtant nuo paskutinių 3 tarp sluoksnių ribų



46 pav. Akustinės energijos kiekio dalys, signalui prasiskverbiant į bandinį ir grįžtant nuo sumodeliuotų defektų

6 lentelė. Sugrįžęs energijos kiekis nuo skirtingų ribų

Tarp sluoksnių riba	Sugrįžusios iki bandinio paviršiaus energijos kiekio dalis, %	
	Nuo ribos be defekto	Nuo defekto
2 3	0,2026	0,3178
3 4	0,0267	0,0418

Gauti teorinio modeliavimo rezultatai pilnai atitinka paskaičiavimus. Iš gilesnių bandinio sluoksnių akustinės energijos atgal į paviršių beveik negrįžta, tad ir gauti kažkokius duomenis jau nėra iš ko. Kitas akivaizdus faktas yra tas, kad akustinė energija pro defektą, kuriame yra oro, taip pat praktiškai neprasisiskverbia ir beveik visa yra atspindima nuo defekto atgal link bandinio paviršiaus. 6 lentelėje pateiktas palyginimas kokia išspinduliuotos į bandinį akustinės energijos kiekio dalis grįžta su atspindžiu nuo ribų su defektais ir be defektų. Iš paskaičiavimų ir vaizdinių rezultatų matome, kad iki bandinio paviršiaus sugrįžusi energijos kiekio dalis nuo defektų yra apie 1,57 karto didesnė nei nuo tų pačių ribų be defektų. Nuo skirtingame gylyje esančių defektų sugrįžusios energijos kiekio dalis skiriasi apytiksliai 7,6 karto. Žinant, kad defektų gylis skiriasi tik per vieną 0,4 mm storio aliuminio sluoksnį, toks sugrįžusių energijų skirtumas yra pakankamai didelis.

Kitas neigiamą įtaką rezultatams turintis veiksnys yra atspindžių destruktvyvioji interferencija, kuri atsiranda dėl daugelio atspindžių, sklindančių nuo skirtingų tarp sluoksnių ribų, tarpusavio sąveikos. Dėl skirtingų kiekvieno gretimo struktūros sluoksnio akustinių savybių dalis pirminio signalo atspindžių turės nevienodas fazes, ko pasekoje jie vienas kitą slopins ir atgal į keitiklį grįžęs suminis atspindžių signalas bus dar mažesnės amplitudės, nei tuo atveju jei nepasireikštų destruktvyvioji interferencija.

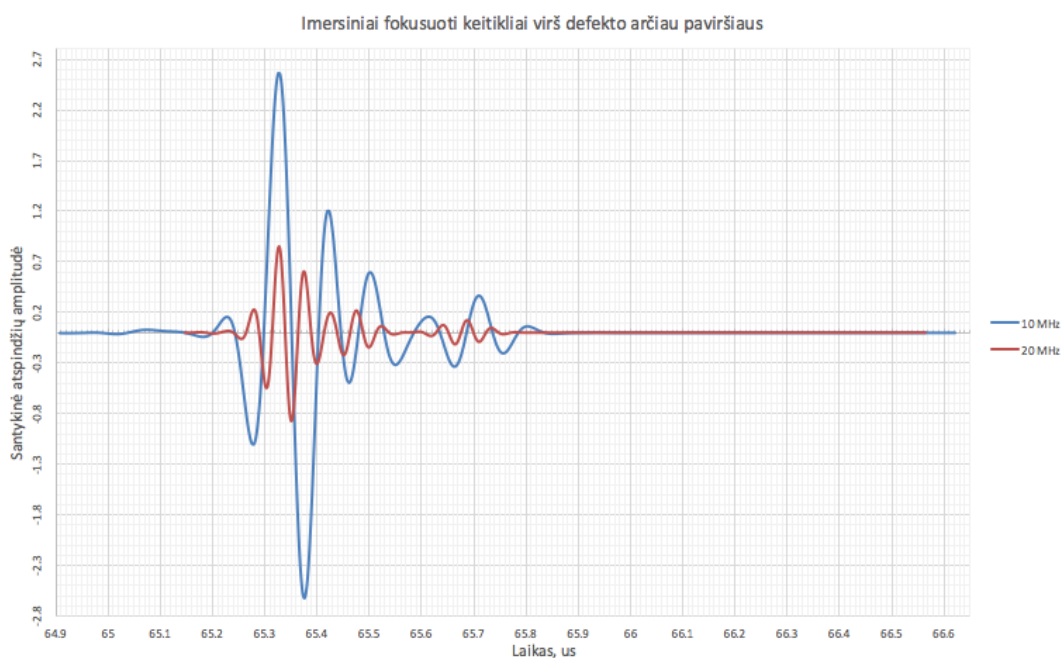
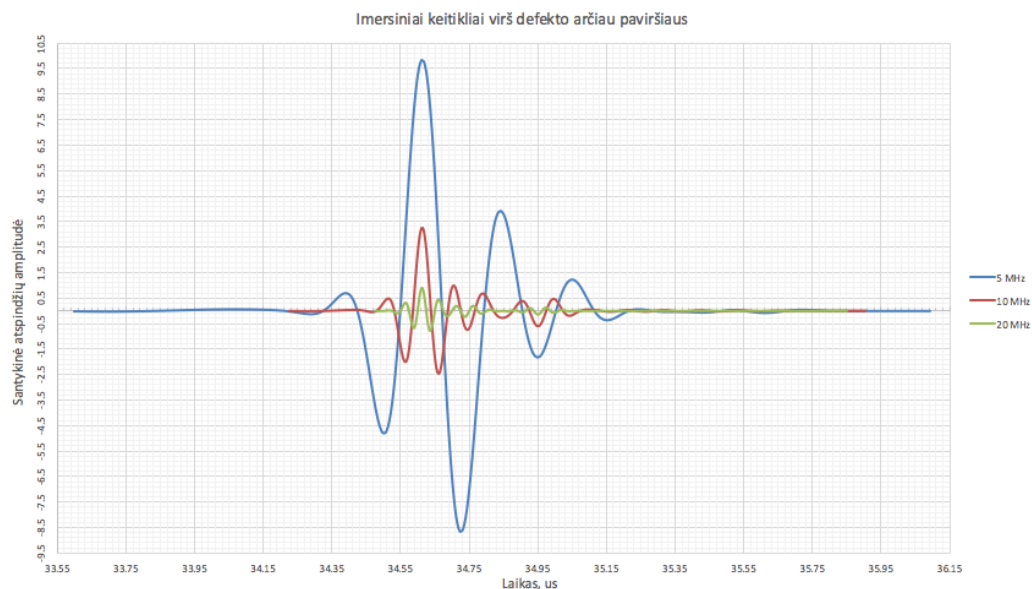
Jei grįžti prie aukščiau minėto sąlygų supaprastinimo, kad stiklo pluoštas dervoje neturi įtakos akustinio signalo sklidimui, matome, kad jis tikrai nėra teisingas. Stiklo pluoštas neabejotinai turės įtakos defektų aptikimo galimybėms ne tik dėl besiskiriančių akustinių savybių, bet ir dėl destruktvyviosios interferencijos, kadangi akustinio signalo sąveika su kiekviena stiklo pluošto gija leis susidaryti didžiuliam kiekiui papildomų atspindžių, kurie savo ruožtu toliau interferuos tarpusavyje, silpnindami bendrą į keitiklį grįžtantį signalą.

Šie aukščiau aprašyti procesai vyksta kiekviename bandinio sluoksnyje, kurį pasiekia ultragarso signalas. Dėl to ultragarso signalo energijos dalis prasiskverbianti gilyn į bandinį stipriai sumažėja.

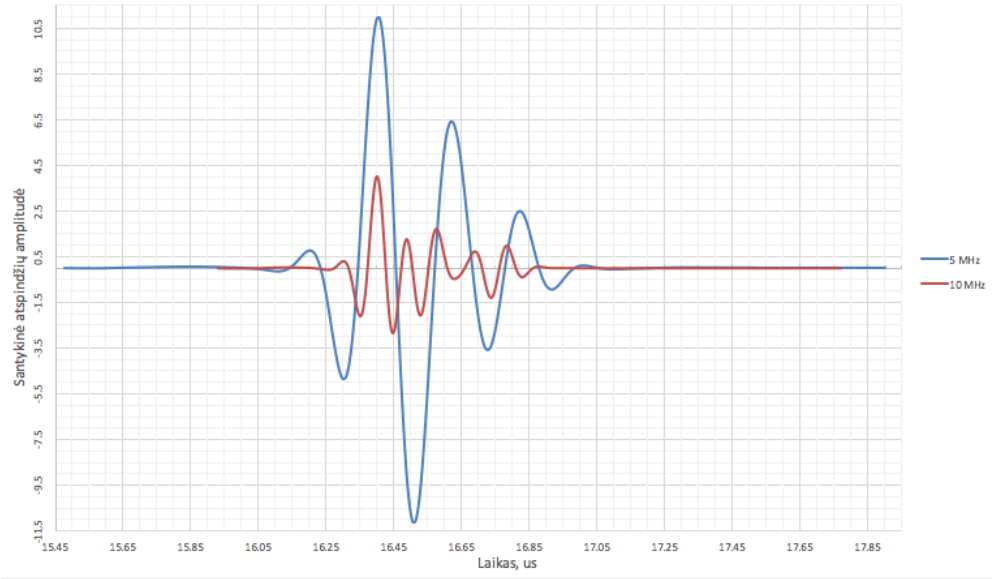
Šiais reiškiniais būtų galima paaiškinti ir staigų signalo susilpnėjimą (arba ir visišką dingimą) jam pasiekus defektą, užpildytą oru. Kaip matyti iš 5 lentelės duomenų, oro akustinė varža yra daug kartų mažesnė nei kitų bandinių sudarančių medžiagų, todėl signalas yra stipriai atspindimas nuo defekto viršaus. Dėl šios priežasties A vaizduose ir yra matomas didesnės amplitudės atspindžio signalas, kai keitiklis pozicionuojamas virš defekto. Dėl stipraus atspindžio nuo defekto viršaus į patį defektą prasiskverbia jau nykstamai maža pirminio signalo dalis. Be to, taip pat stipriai atspindima ir į defektą prasiskverbęs signalo dalis nuo defekto dugno, kadangi defekto dugno oras ribojasi arba su aliuminiu (pirmojo defekto atveju), arba su epoksidine derva (antro defekto atveju). Dėl to signalas pro defektą jau praktiškai neprasiskverbia ką ir parodo gauti kompiuterinio modeliavimo rezultatai.

4.5. Tinkamiausio keitiklio pasirinkimas

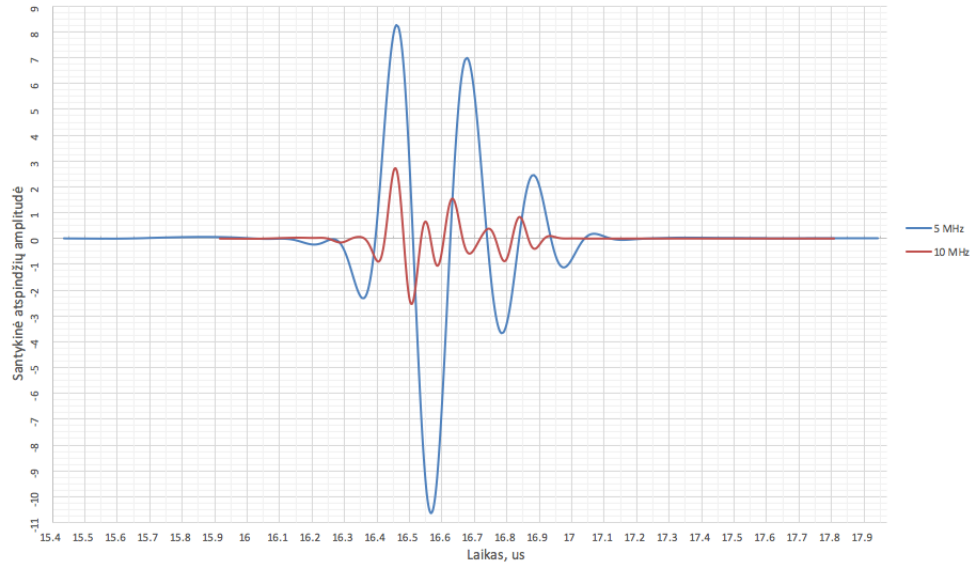
47 – 53 paveikslėliuose pateikti skirtingais keitikliais gautų atspindžių, užfiksuotų nuo arčiau paviršiaus esančio defekto, palyginimai. Atspindžiai nuo šio defekto palyginimui paimti dėl didesnės amplitudės. Palyginimo rezultatai, turėtų būti tapatūs ir atvejui su gilesniu defektu, kadangi pačių keitiklių parametrai gylio atžvilgiu nesikeičia.



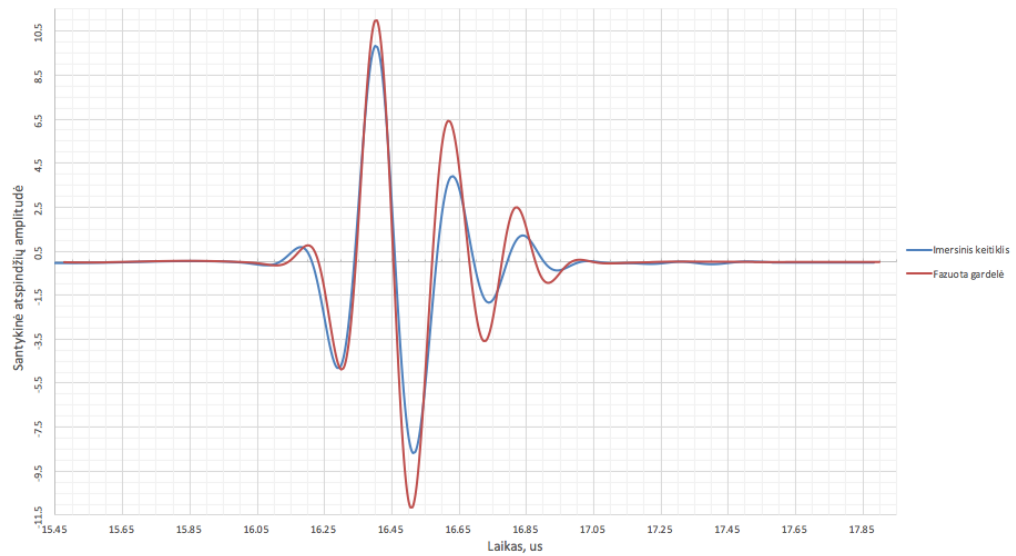
Fazuotos gardelės virš defekto arčiau paviršiaus

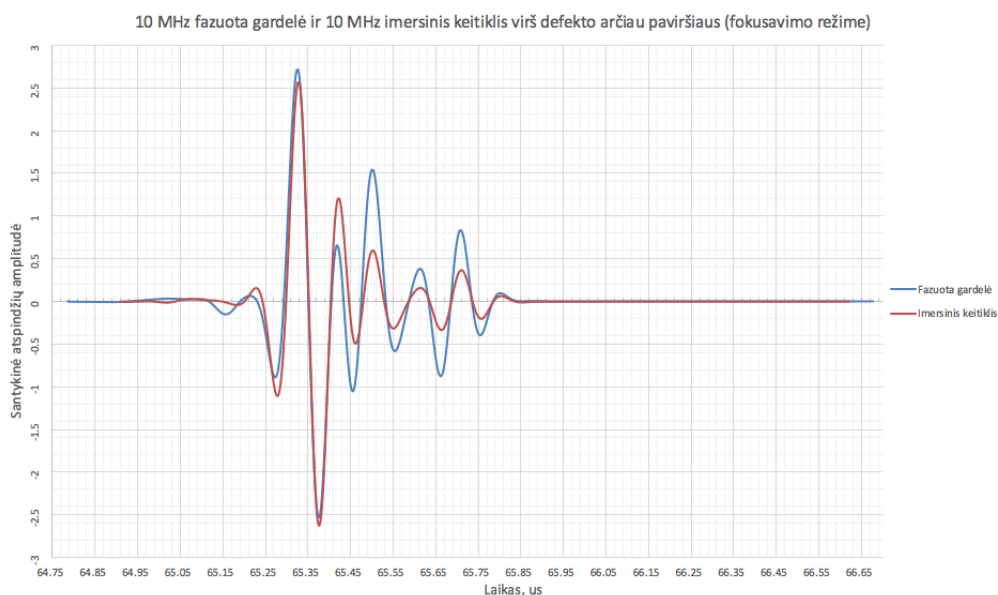
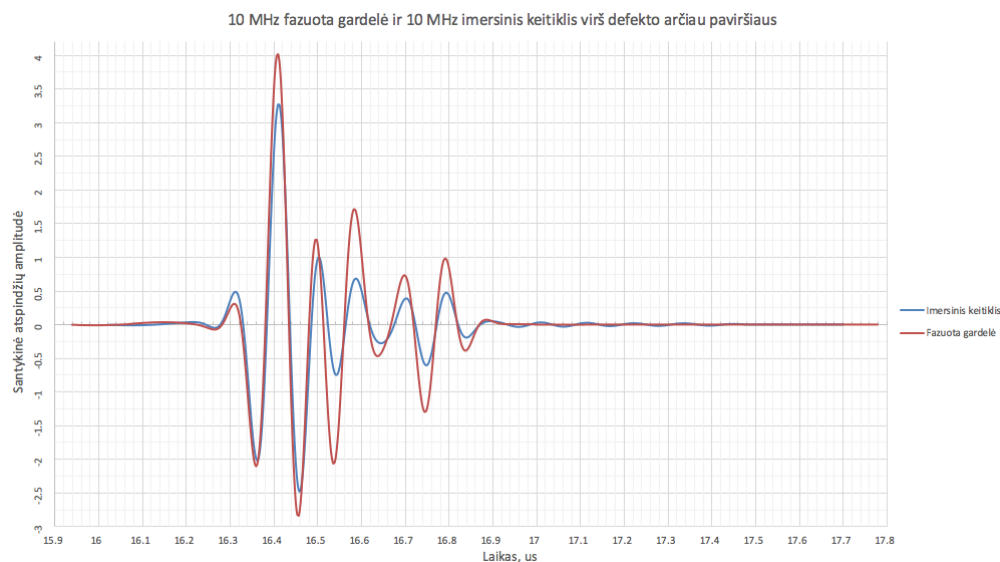


Fazuotos gardelės virš defekto arčiau paviršiaus (fokonavimo režimas)



5 MHz fazuota gardelė ir 5 MHz imersinis keitiklis virš defekto arčiau paviršiaus





47 – 53 pav. Skirtingais keitikliais gautų A vaizdų palyginimai

Iš turimų palyginimų galima padaryti sekančias išvadas:

1. esminę įtaką tokio tipo bandinio tyrimo ultragarsu rezultatams turi būtent keitiklio darbinis dažnis;

2. bent jau kompiuterinio modeliavimo metu keitiklio darbo režimo (signalas fokusuotas arba nefokusuotas) pakeitimas nedavė esmingai skirtingų rezultatų. Kompiuterinio modeliavimo metu fokusavimo gylis visiems keitikliams parinktas bandinio viduryje, kur yra ir defektai. Realiomis sąlygomis, įrangos operatorius gali ir nežinoti, kokiam tiriamojo objekto gylyje yra defektai, tad fokuso nuotolis nebūtinai bus parinktas tinkamai ir tyrimo rezultatams tai, tikėtina, turėtų įtakos. Akivaizdus fokusavimo režimo trūkumas yra sumažėjusi atspindžių amplitudė;

3. didžiausios atspindžių amplitudės gaunamos naudojant nedidelio darbinio dažnio keitiklius. Šiuo atveju mažiausias naudotas dažnis buvo 5 MHz. Nepaisant to, 5 MHz darbinio dažnio signalas sukuria atspindžius, kurie yra sunkiai atskiriami vienas nuo kito, kadangi pirmesnio atspindžio pabaiga stipriai persidengia su paskesnio atspindžio pradžia. Tokiu būdu gaunami sunkiai

interpretuojami duomenys. Taip pat nedidelio dažnio signalo skverbties gylio daugiasluoksniėje struktūroje yra mažesnis nei didesnio dažnio;

4. labai didelio dažnio (20 ir daugiau MHz) keitiklių naudojimas nebūtų prasmingas, dėl gaunamų labai mažų amplitudžių atspindžių;

5. rezultatų kokybei ir patikimumui įtakos turės ir keitiklio tipas, tačiau keitiklio darbo dažnio tinkamas parinkimas yra svarbesnis.

47 – 53 paveiksluose pateikti palyginimai leidžia apibendrinti kai kuriuos keitiklių privalumus ir trūkumus plonų daugiasluoksnių struktūrų tyrimui, tačiau jais remiantis negalima pasakyti kiek smarkiai savo amplitudė skiriasi pirminis signalas nuo atspindžių gautų gilesnio ir arčiau paviršiaus esančio defekto atvejais.

7 lentelė. Pirminio signalo ir atspindžio nuo gilesnio defekto atskiriamumas

Keitiklio tipas	Atspindžio amplitudė, dB		Skirtumas tarp amplitudžių, dB	Skirtumas, proc. nuo defekto signalo	Skirtumas, proc. nuo pirminio signalo
	Gilesnis defektas	Be defektu			
Imersinis nefokusuojantis 5MHz, Olympus V309-SU	-17	-18	1	5,88	5,56
Imersinis nefokusuojantis 10MHz, Olympus V311-SU	-24,3	-28,6	4,3	17,70	15,03
Imersinis nefokusuojantis 20MHz, Olympus V317-SU	-23,3	-26,5	3,2	13,73	12,08
Imersinis fokusuojantis 10MHz, Olympus V327-SU-F	-25,3	-26,1	0,8	3,16	3,07
Imersinis fokusuojantis 20MHz, Olympus V317-SU-F	-26	-27,7	1,7	6,54	6,14
Faz. gardelė I. skenav. rež. 5MHz, 5L128-128x7-NW3-P-2.5-OM	-12,6	-13,6	1	7,94	7,35
Faz. gardelė I. skenav. rež. 10MHz, 10L64-64x7-NW1-P-2.5-OM	-17,5	-16,87	0,63	3,60	3,73
Faz. gardelė fokusav. rež. 5MHz, 5L128-128x7-NW3-P-2.5-OM	-20,4	-22,6	2,2	10,78	9,73
Faz. gardelė fokusav. rež. 10MHz, 10L64-64x7-NW1-P-2.5-OM	-18,4	-20,4	2	10,87	9,80

8 lentelė. Pirminio signalo ir atspindžio nuo arčiau paviršiaus esančio defekto atskiriamumas

Keitiklio tipas	Atspindžio amplitudė, dB		Skirtumas tarp amplitudžių, dB	Skirtumas, proc. nuo defekto signalo	Skirtumas, proc. nuo pirminio signalo
	Defektas arčiau paviršiaus	Be defektu			
Imersinis nefokusuojantis 5MHz, Olympus V309-SU	-14,5	-18	3,5	24,14	19,44
Imersinis nefokusuojantis 10MHz, Olympus V311-SU	-15,5	-28,6	13,1	84,52	45,80
Imersinis nefokusuojantis 20MHz, Olympus V317-SU	-16,2	-26,5	10,3	63,58	38,87
Imersinis fokusuojantis 10MHz, Olympus V327-SU-F	-17	-26,1	9,1	53,53	34,87
Imersinis fokusuojantis 20MHz, Olympus V317-SU-F	-18,5	-27,7	9,2	49,73	33,21
Faz. gardelė l. skenav. rež. 5MHz, 5L128-128x7-NW3-P-2.5-OM	-11,2	-13,6	2,4	21,43	17,65
Faz. gardelė l. skenav. rež. 10MHz, 10L64-64x7-NW1-P-2.5-OM	-10,6	-16,87	6,27	59,15	37,17
Faz. gardelė fokusav. rež. 5MHz, 5L128-128x7-NW3-P-2.5-OM	-13,4	-22,6	9,2	68,66	40,71
Faz. gardelė fokusav. rež. 10MHz, 10L64-64x7-NW1-P-2.5-OM	-12,6	-20,4	7,8	61,90	38,24

Remiantis 7 ir 8 lentelėse pateikta apibendrinta informacija galima įvertinti kuriuo keitikliu gautus atspindžius bus lengviausia atskirti nuo pirminio signalo. Tas ypač svarbu giliau esančių defektų aptikimui, kadangi didėjant gyliui amplitudžių tarp pirminio signalo ir jo atspindžio nuo defekto skirtumas smarkiai mažėja. Kaip jau buvo rašyta aukščiau, gilesni defektai daugiasluoksnyje struktūroje turėtų būti aptinkami gana sunkiai dėl labai mažos nuo gilesnių sluoksnių atspindėtos ir sugrįžusios į keitiklį ultragarsinio signalo energijos.

Pagal 47 – 53 paveikslų, bei 7 – 8 lentelių duomenis matyti, kad iš visų kompiuteriniame modeliavime bandytų keitiklių, teoriškai plonų, sudarytų iš kelių skirtingos medžiagos sluoksnių, struktūrų tyrimui ultragarsu labiausiai turėtų būti tinkamas 10 MHz nefokusuojantis imersinis keitiklis. Toks keitiklis tiktų tiek ir arčiau paviršiaus, tiek ir giliau esančių defektų aptikimui. Arčiau paviršiaus esančių defektų aptikimui dar būtų galima naudoti 5 MHz darbinio dažnio fazuotą gardelę, dirbančią fokusuotu signalu.

Vertinant iš praktinės pusės, taip pat susiduriama su imersinio keitiklio, bei fazuotos gardelės privalumais ir trūkumais. Nors teoriškai imersinis nefokusuojantis keitiklis turėtų būti geriausias pasirinkimas atliekant plonų daugiasluoksnių objektų tyrimą ultragarsu, tačiau tokio keitiklio

naudojimui reikalinga papildoma, dažnai didelių gabaritų vandens laikymo, bandinio įtvirtinimo ir pozicionavimo įranga. Be to, tokia įranga paprastai yra stacionari. Kita vertus, turima visa reikalinga įranga leidžia tirti bet kokios formos ir plataus diapazono matmenų objektus.

Fazuotos gardelės pagrindinis privalumas yra tas, kad tyrimui užtenka pačio keitiklio ir keitiklio valdymo, bei duomenų apdorojimo ir atvaizdavimo įrangos, kuri yra pakankamai kompaktiška ir dažniausiai nereikalauja specialios papildomos įrangos tyrimui ultragarsu atlikti. Tai yra bene svarbiausias privalumas lyginant su imersiniu keitikliu, kadangi kompaktiška įranga leidžia objektų tyrimus atlikti jų priežiūros, remonto ir pan. vietose, taip sutaupant laiko ir išlaidų (iš)montavimui, transportavimui ir pan.

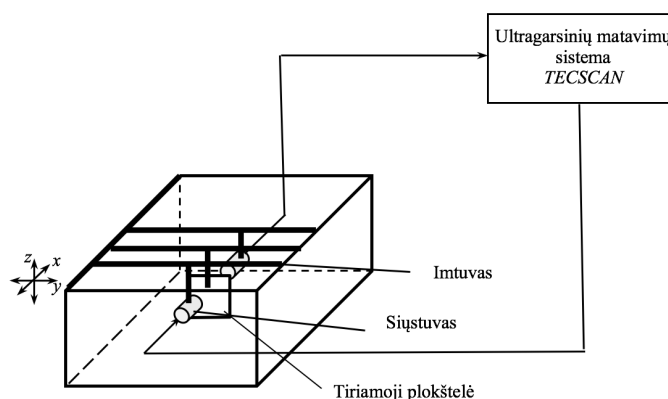
Pagrindinis trūkumas yra fazuotos gardelės matmenys. Be to, gardelės ar su ja naudojamos vėlinimo linijos paviršius yra standus. Dėl šių priežasčių tiriamo objekto paviršius turi būti lygus, nedeformuotas, nuvalytas. Net ir nedidelis nelygumas įtakos gardelės (vėlinimo linijos) kontakto su tiriamo objekto paviršiumi kokybę, kas kartu paveiks ir gaunamų atspindžių kokybę arba net neleis gauti jokio atspindžio iš norimos ištirti srities.

Teorinis modeliavimas parodė, kad nagrinėjamo tipo struktūroms tirti nereikalinga naudoti labai aukšto dažnio fazuotų gardelių.

5. Eksperimentiniai matavimai

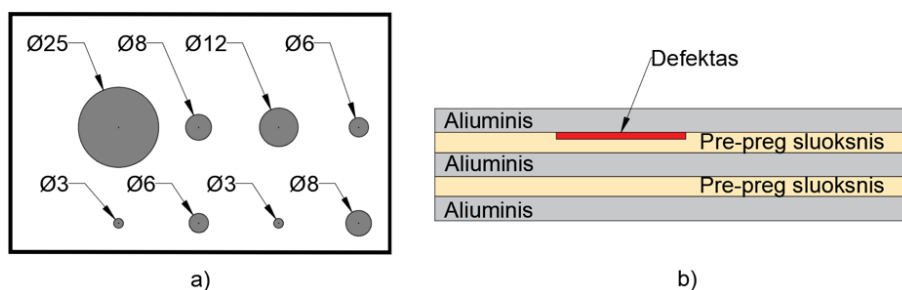
5.1. Matavimas imersiniu keitikliu praėjimo metodu

Matavimui naudota ultragarsinė matavimo sistema „*Tecscan*“. Panaudotas 5 MHz plokščiasis imersinis ultragarsinis keitiklis ir GLARE-32 bandinys. Eksperimentinė schema pateikta 63 pav. Keitiklis fiksuojamas ant nejudančios skenerio kreipiančiosios, GLARE-32 bandinys pritvirtinamas prie skenerio z ašies kreipiančiosios. Keitiklis pagal x , y ir z ašis pozicionuojamas taip, kad būtų gauta maksimali atspindėto signalo amplitudė.



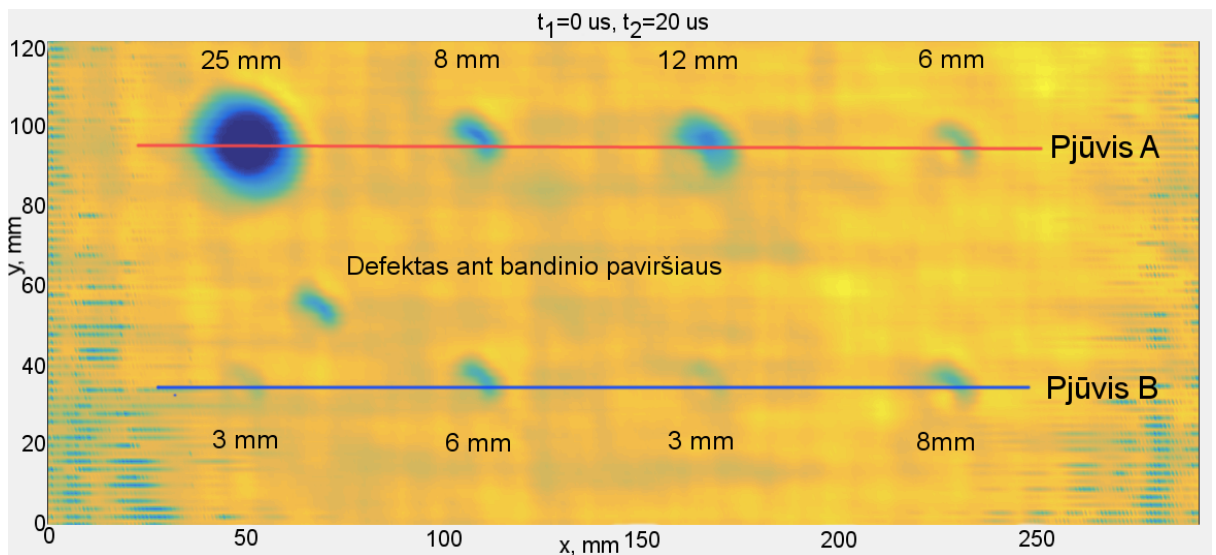
54 pav. *Tecscan* matavimo sistemos sujungimo schema matavimams praėjimo režimu

Bandinyje yra suformuoti keli skirtingo skersmens defektai po pirmuoju aliuminio sluoksniu, kaip parodyta 64 paveiksle. Kiekvieno aliuminio sluoksnio storis 0,3 mm, kiekvieno „pre-preg“ sluoksnio storis 0,25 mm.

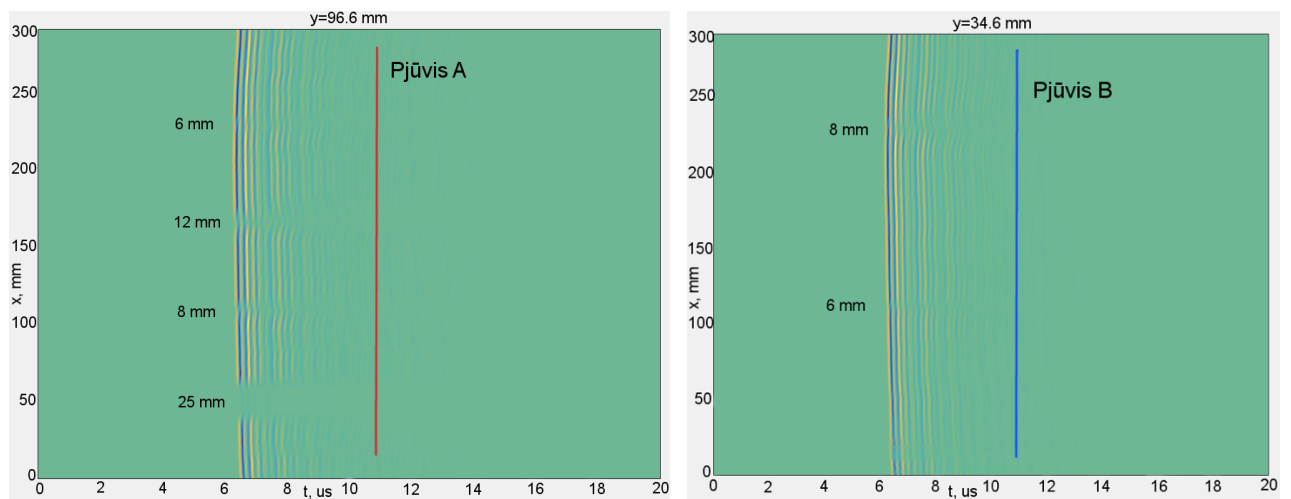


55 pav. a) bandinio defektų kiekis ir matmenys mm, b) bandinio vidinė struktūra

Matavimo metu gauti B ir C vaizdai pateikti 56 – 57 paveiksluose.



56 pav. GLARE bandinio C vaizdas



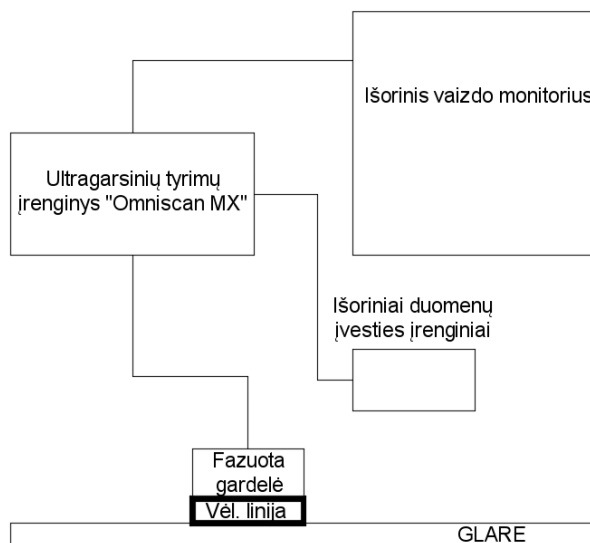
57 pav. GLARE bandinio B vaizdai

Be papildomo gautų duomenų apdorojimo, C vaizde dar galima įžiūrėti ir pačius mažiausius 3 mm skersmens defektus. Tuo tarpu, B vaizde šių defektų užfiksavimui būtų reikalingos papildomos duomenų apdorojimo priemonės.

Nepaisant to, gauti rezultatai yra tikrai geri. Įsitikinta, kad imersinis metodas tokio tipo struktūroms tirti yra labai geras pasirinkimas, tačiau tinkamas iš esmės tik laboratorijos sąlygomis. Metodo pagrindinis trūkumas, neleidžiantis jo naudoti orlaivių remonto ir periodinės patikros vietose, yra didelių gabaritų, brangi ir nemobili įranga.

5.2. Matavimas fazuotomis gardelėmis

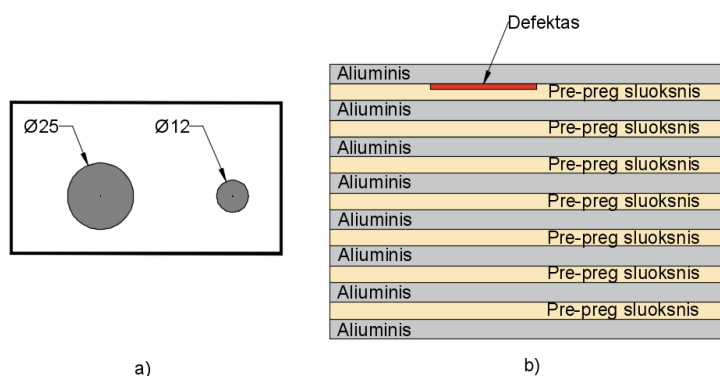
5 MHz linijinis skenavimas fokusuotu ir nefokusuotu signalais



58 pav. Tyrimui fazuotomis gardelėmis naudota įranga.

Eksperimentiniams matavimams naudotos 5 MHz ir 10 MHz darbinio dažnio fazuotos gardelės, kurių visi parametrai tokie patys, kaip nurodyta kompiuterinio modeliavimo aprašyme. 8 lentelėje pateikti eksperimento metu naudoti visos matavimo įrangos darbo parametrai A ir B tipų vaizdams. Gardelės naudotos su organinio stiklo „SNW3-OL“ tipo vėlinimo linija, kurios aukštis 20 mm. Garso greitis vėlinimo linijoje 1590 m/s.

Buvo matuojama dviem atvejais, kai gardelė dirba linijiniame režime fokusuotu signalu (fokusavimo nuotolis 3 mm) ir nefokusuotu signalu. 5 MHz dažnio gardelės matmenys leido vienu metu užfiksuoti 2 skirtingų matmenų (25 ir 12 mm) defektus.



59 pav. a) tyrimui fazuotomis gardelėmis naudoto bandinio defektų matmenys mm, b) bandinio vidinė struktūra

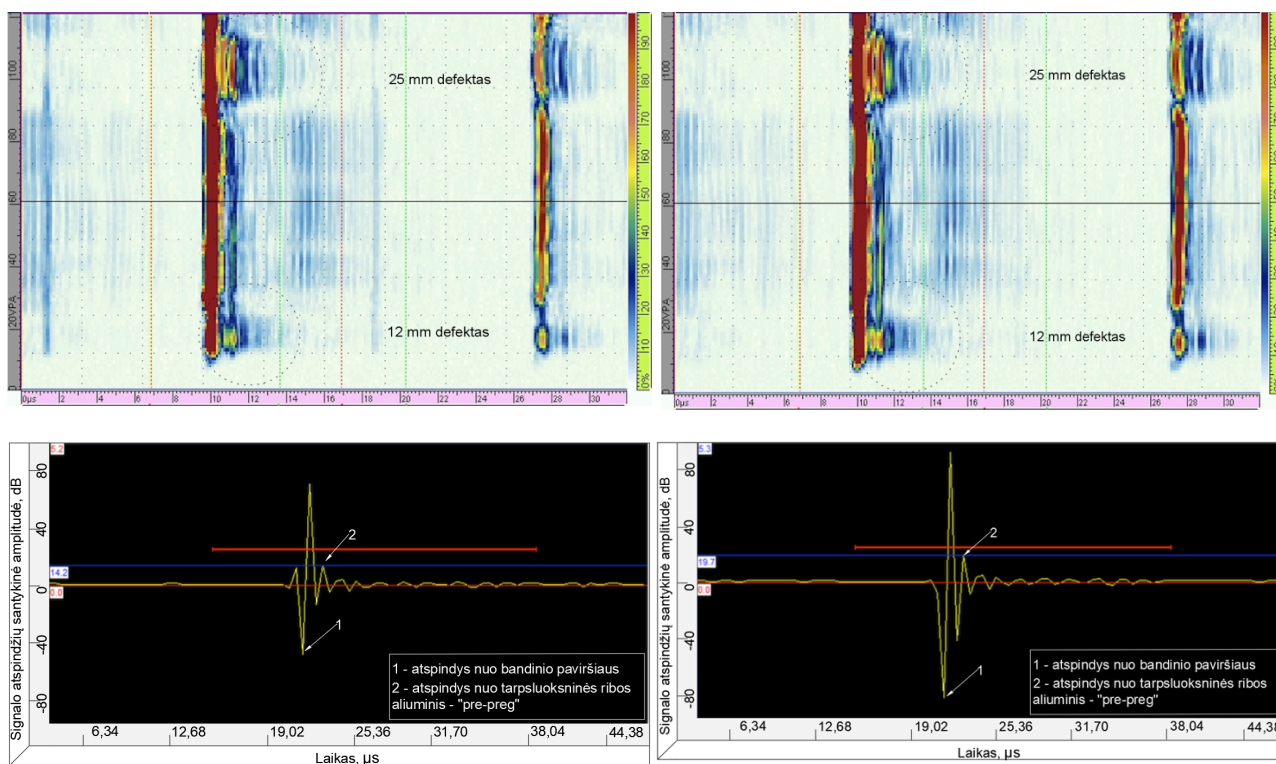
Bandinys sudarytas iš 8 aliuminio sluoksnių, kurių kiekvieno storis turėtų būti 0,4 mm ir 7 pre-preg sluoksnių, kurių kiekvieno storis 0,25 mm. Bendras bandinio storis turėtų būti 4,95 mm, tačiau realus pamatuotas storis ties defektais yra apie 6,5 mm. Tad nuokrypis nuo deklaruojamų gamyklinių parametrų pakankamai didelis. Priėmus sąlyga, kad nežinoma kokiam gylyje randasi defektai,

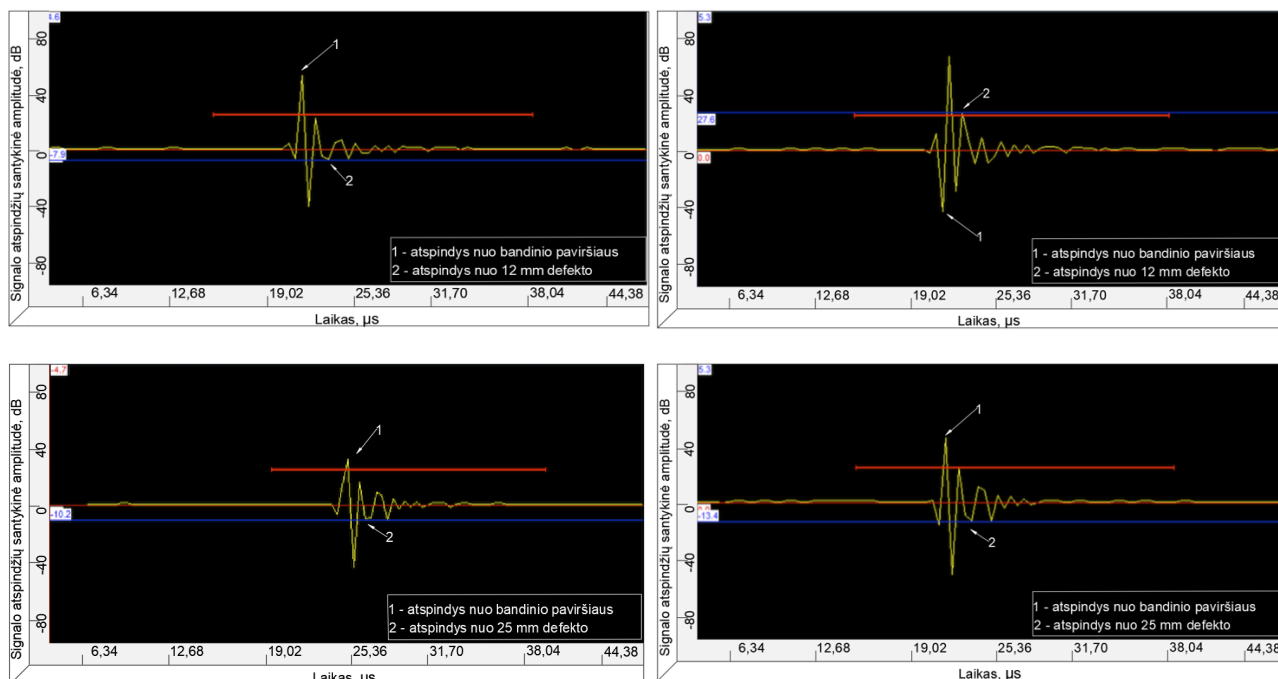
parinktas gardelės spindulio fokusavimo nuotolis lygus 3 mm ir yra apytiksliai tiriamos srities viduryje.

9 lentelė. Įrangos darbiniai parametrai, matuojant 5 MHz dažnio gardele

Matavimo parametrai	Fokusuotas signalas (A / B vaizdai)	Nefokusuotas signalas (A / B vaizdai)
Darbo įtampa, V	40	40
Pradžios laikas, us	-0,02 / -0,05	-0,02 / -0,05
Stiprinimas, dB	9 / 27	9 / 27
Visas signalo sklidimo laikas, us	67,2 / 32	67,2 / 32
Tyrimo metodas	Kontaktinis aido	Kontaktinis aido
Bangos kritimo kampas, laipsn.	90	90
Bangos tipas	Išilginė	Išilginė
Bangos greitis, m/s	6300	6300
Signalo plotis, ns	100	100
Filtravimas	Nėra	Nėra
Apertūros dydis	8 elementai	8 elementai

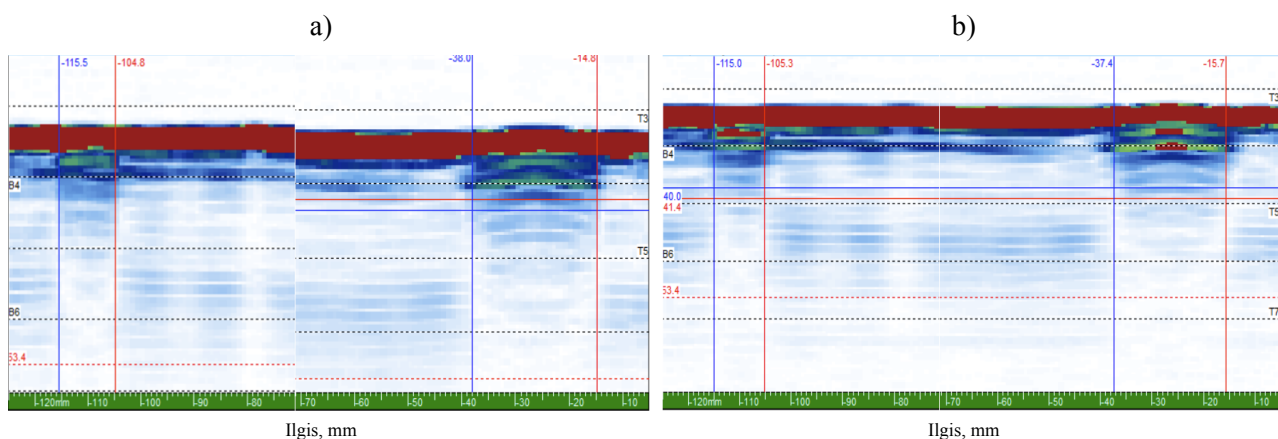
60 paveiksle pateikti eksperimento su 5 MHz darbinio dažnio gardele rezultatai.





60 pav. A ir B vaizdai: kairėje – fokusuotas signalas, dešinėje – nefokusuotas signalas

Skirtingo lygio signalo stiprinimas parinktas dėl to, kad gauti kontrastingesnius B vaizdus, kartu gaunant pilnos apimties amplitudines charakteristikas. Pagal gautus rezultatus aiškiai matyti, kad didžiausia atspindžio amplitudė gaunama naudojant nefokusuotą signalą, tuo tarpu, B vaizdas yra geresnis naudojant fokusuotą signalą – dar matomas pakankamai aiškus atspindys nuo bandinio dugno.



61 pav. Defektų matmenys pagal B vaizdą: a – fokusuotas signalas, b – nefokusuotas signalas

Iš 61 pav. pateiktų rezultatų galima įvertinti eksperimentiškai nustatytus defektų matmenis. Naudojant fokusuotą signalą nustatytas mažesniojo defekto skersmuo 10,7 mm, didesniojo defekto – 23,2 mm. Naudojant nefokusuotą signalą nustatytas mažesniojo defekto skersmuo 9,7 mm, didesniojo defekto – 21,7 mm.

10 lentelė. Defektų tikrųjų matmenų palyginimas su išmatuotais 5 MHz fazuota gardele

Signalų tipas	Tikrieji defekto matmenys, mm	Nustatyti defekto matmenys, mm	Nuokrypis, mm	Nuokrypis, %
Fokusuotas	25,00	23,20	1,80	7,20
	12,00	10,70	1,30	10,83
Nefokusuotas	25,00	21,70	3,30	13,20
	12,00	9,70	2,30	19,17

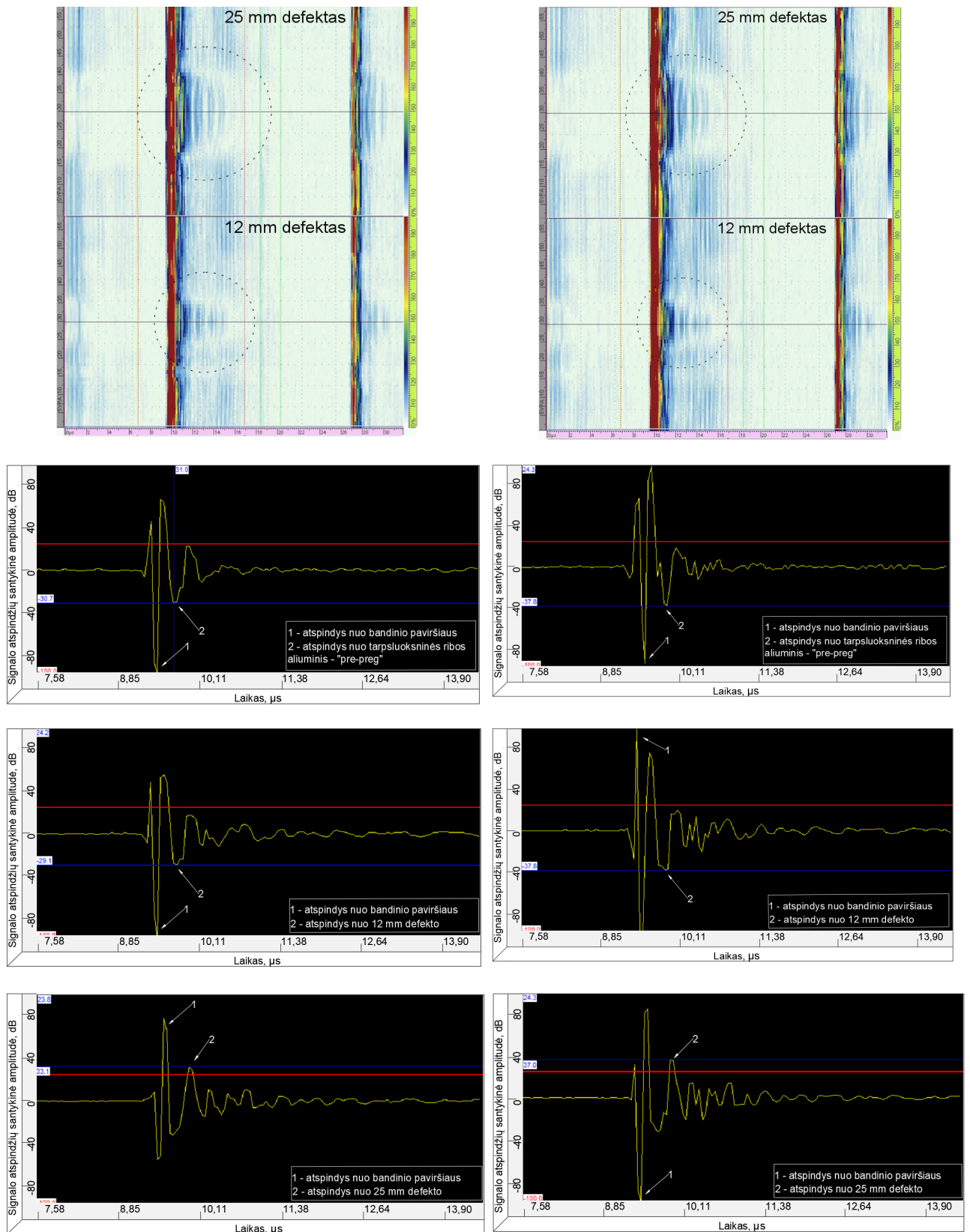
Kaip matyti iš 10 lentelėje pateikto palyginimo, fazuota gardele naudojant fokusuotą signalą abiejų defektų matmenys nustatyti tiksliau. Taip pat logiška, kad didesnio defekto matmenys įvertinti tiksliau.

10 MHz linijinis skenavimas fokusuotu ir nefokusuotu signalais

Matavimui su 10 MHz gardele naudota ta pati aukščiau aprašyta matavimo įranga ir naudotas tas pats bandinys. Ši gardele yra mažesnių matmenų, todėl vienu metu užfiksuoti du skirtingų matmenų defektus iškart nepavyko. Kiekvienas defektas buvo fiksuojamas atskirai, o gauti rezultatai pateikti 62 paveiksle. 11 lentelėje pateikti eksperimento metu naudoti visos matavimo įrangos darbo parametrai A ir B vaizdams.

11 lentelė. Įrangos darbiniai parametrai, matuojant 10 MHz dažnio gardele

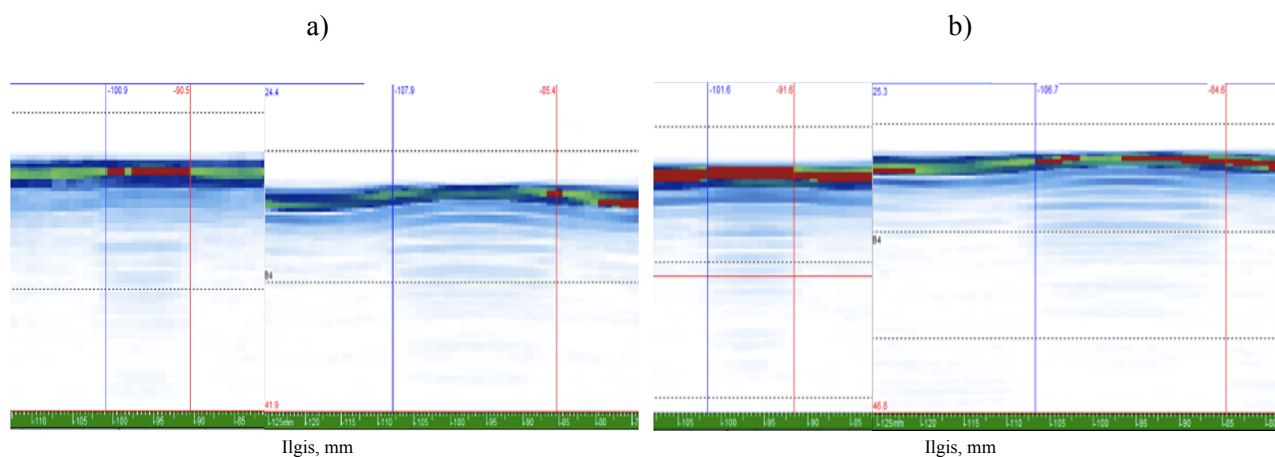
Matavimo parametrai	25 mm defektas		12 mm defektas	
	Fokusuotas signalas (A / B vaizdai)	Nefokusuotas signalas (A / B vaizdai)	Fokusuotas signalas (A / B vaizdai)	Nefokusuotas signalas (A / B vaizdai)
Darbo įtampa, V	40	40	40	40
Pradžios laikas, μ s	-0,04 / -0,08	-0,04 / -0,08	-0,07 / -0,1	-0,06 / -0,1
Stiprinimas, dB	21 / 35	21 / 35	21 / 35	21 / 35
Visas signalo sklidimo laikas, μ s	16 / 32	16 / 32	16 / 32	16 / 32
Tyrimo metodas	Kontaktinis aido	Kontaktinis aido	Kontaktinis aido	Kontaktinis aido
Bangos kritimo kampas, laipsn.	90	90	90	90
Bangos tipas	Išilginė	Išilginė	Išilginė	Išilginė
Bangos greitis bandinyje, m/s	6300	6300	6300	6300
Signalų plotis, ns	50	50	50	50
Filtravimas	Nėra	Nėra	Nėra	Nėra
Apertūros dydis	7 elementai	7 elementai	7 elementai	7 elementai



62 pav. A ir B vaizdai: kairėje – fokusuotas signalas, dešinėje – nefokusuotas signalas

Tyrimas su 10 MHz fazuota gardėle parodė analogiškus rezultatus kaip ir 5 MHz atveju.

A vaizduose didesnės amplitudės atspindžiai gaunami naudojant nefokusuotą signalą, o B vaizdas geresnis gaunamas su fokusuotu signalu.



63 pav. Defektų matmenys pagal B vaizdą: a – fokusuotas signalas, b – nefokusuotas signalas

Iš 63 pav. pateiktų rezultatų galima įvertinti eksperimentiškai nustatytus defektų matmenis. Naudojant fokusuotą signalą nustatytas mažesniojo defekto skersmuo 10,4 mm, didesniojo defekto – 22,5 mm. Naudojant nefokusuotą signalą nustatytas mažesniojo defekto skersmuo 10 mm, didesniojo defekto – 22,1 mm.

12 lentelė. Defektų tikrųjų matmenų palyginimas su išmatuotais 10 MHz fazuota gardele

Signalų tipas	Tikrieji defekto matmenys, mm	Nustatyti defekto matmenys, mm	Nuokrypis, mm	Nuokrypis, %
Fokusuotas	25,00	22,50	2,50	10,00
	12,00	10,40	1,60	13,33
Nefokusuotas	25,00	22,10	2,90	11,60
	12,00	10,00	2,00	16,67

12 lentelės duomenys rodo, kad skirtumas tarp fokusuoto ir nefokusuoto signalų rezultatų yra mažesnis nei 5 MHz fazuotos gardelės atveju. Palyginus abiejų darbinių dažnių gardelių matavimo rezultatus matoma, kad abiejų defektų matmenys tiksliau įvertinti panaudojus 5 MHz gardelę, dirbančią fokusuotu signalu. Jei lygintume nefokusuoto signalo rezultatus, tai tikslesni rezultatai gauti naudojant 10 MHz fazuotą gardelę, dirbančią nefokusuotu spinduliu.

5.3. Rezultatų apibendrinimas

Eksperimentiniai matavimų fazuotomis gardelėmis rezultatai leidžia padaryti kai kuriuos apibendrinimus.

1. Pirmiausia įsitikinta, kad teoriniame modeliavime yra sunku įvertinti visas aplinkybes, kurios gali atsirasti realaus tyrimo metu

2. Gautuose B vaizduose aiškiai matomas nevienodas atspindžių amplitudžių pasiskirstymas bandinio tūryje. Matomos didesnės ir mažesnės amplitudžių zonos. Visais atvejais atspindžiai intensyviausi bandinio paviršiniuose sluoksniuose ir bandinio viduryje. Tokios zonos kiek aiškiau matomos naudojant fokusuotą signalą. Nuo bandinio vidurio gilyn atspindžiai tolygiai silpnėja, bet ties dugnu vėl suintensyvėja. Tikėtina, jog to priežastis yra akustinės energijos perėjimas iš bandinio į kitų akustinių savybių aplinką. Tokie rezultatai leidžia manyti, kad panašių matmenų defektus identifikuoti bandinio viduriniuose sluoksniuose būtų pakankamai nesudėtinga. Teoriniame

modeliavime tokia galimybė nebuvo numatyta. Defektus, esančius giliau bandinio vidurio identifikuoti būtų sudėtingiausia;

3. Reikia pažymėti ir tai, kad buvo bandoma užfiksuoti pakankamai didelių matmenų (didelio ploto) defektus. Mažesnių nei 10 mm skersmens defektų identifikavimas jau ir pirmuose bandinio sluoksniuose būtų pakankamai komplikotas.

4. Eksperimento rezultatai taip pat parodė, kad fokusuotas signalas turi pranašumą prieš nefokusuotą, tačiau pranašumas mažėja didėjant darbiniam fazuotos gardelės dažniui. Pagrindinis fokusuoto signalo minusas tas, kad gaunami mažesnės amplitudės atspindžiai.

5. Lyginant 5 MHz ir 10 MHz fazuotų gardelių duomenis galima pasakyti, kad 10 MHz gardele gaunami ženkliai mažesnės amplitudės atspindžiai. 8 ir 10 lentelėse galima matyti, kad 5 MHz gardelės signalas (pilnos apimties A vaizdams gauti) matavimo įrangos pagalba buvo stiprinamas 9 dB, o 10 MHz gardelės – 21 dB. Taigi, atspindžio amplitudės skiriasi apie 15,8 karto. Panašaus kontrasto B vaizdams gauti 5 MHz gardelės signalas buvo stiprinamas 27 dB, o 10 MHz gardelės – 35 dB. Šiuo atveju atspindžio amplitudės skiriasi apie 6,3 karto. Pastebėtas 10 MHz gardelės privalumas tas, kad panaudojus papildomas gauto atspindžio signalo apdorojimo priemones A vaizdai yra interpretuojami lengviau nei 5 MHz gardelės atveju. Abiejų darbinių dažnių gardelėmis nustatyti defektų matmenys yra gana panašūs.

Išvados

1. Atlikus informacijos šaltinių apžvalgą, sužinota, kad kompozitinių metalų laminatų sudėtinga vidaus struktūra lemia komplikuoatą jų patikrą, siekiant identifikuoti laminatose atsiradusius defektus. Sudėtinga vidaus struktūra laminatuose lemia didelę galinčių atsirasti defektų įvairovę. Be to, defektai gali susidaryti ne tik laminato eksploatacijos metu, bet ir skirtinguose gamybos etapuose. Defektų susidarymo priežastys ir mechanizmai taip pat gana skirtingi. Įvertinus laminatų patikroms naudoti galimų metodų galimybes, įrangos sudėtingumą, patikros galimybes, atlikimo ir laiko kaštus, prieita išvados, kad vieni tinkamiausių yra ultragarso metodai.
2. Teorinio modeliavimo metu sukurtas GLARE laminato, su jame esančiais defektais, modelis ir atlikti ultragarso sąveikos su defektais modeliavimai, kurių metu nustatyta, kad tinkamiausias laminatų defektų paieškai yra nefokusuotas 10 MHz imersinis keitiklis ir 5 MHz ultragarsinė fazuota gardelė, dirbanti linijinio skenavimo režime fokusuotu spinduliu. Imersinių keitiklių naudojimas orlaivių techninio aptarnavimo vietose būtų ypatingai sudėtingas. Gauti teorinio modeliavimo rezultatai pagrindžia galimybę atlikti metalų laminatų patikras vietoje imersinių keitiklių naudojant fazuotas gardeles.
3. Pagrindinis fazuotos gardelės parametras, nulemiantis tyrimo rezultatų kokybę yra darbo dažnis. Akustinio signalo fokusavimas taip pat turi teigiamą įtaką tyrimo rezultatų kokybei, tačiau didėjant keitiklio darbo dažniui signalo fokusavimo teigiama įtaka rezultatų kokybei mažėja. Tinkamą fokuso gylį sunku parinkti dėl to, kad metalų laminatai sudaryti iš daugelio labai plonų sluoksnių skirtingų akustinių savybių medžiagos lakštų, o defektai gali susidaryti bet kurioje tarp sluoksninėje riboje. Teorinio modeliavimo ir eksperimento rezultatai parodė, kad GLARE tyrimui pakanka naudoti 5 MHz darbo dažnio fazuotą gardelę. Didesnio dažnio naudojimas nėra prasmingas dėl nedidelių atspindžio amplitudžių.
4. Teorinio modeliavimo metu nustatyta, kad GLARE laminato struktūra labai stipriai slopina akustinį signalą, kadangi šį kompozitą sudaro daugelis skirtingos medžiagos sluoksnių, turinčių smarkiai besiskiriančias akustines varžas. Nustatyta, kad jau nuo 2 tarp sluoksninės ribos iki bandinio paviršiaus sugrįžta vos 0,2026 % iš keitiklio į bandinį išspinduliuotos akustinės energijos. Nuo bandinio dugno atgal iki paviršiaus sugrįžta tik 0,00003 % pirminės akustinės energijos. Defektai akustinį signalą atspindi stipriau, praktiškai visiškai neleisdami jam sklisti gilyn. Nuo 2 tarp sluoksninėje riboje esančio defekto iki bandinio paviršiaus grįžta 0,3178 % pradinės akustinės energijos. Nuo 3 tarp sluoksninėje riboje esančio defekto iki bandinio paviršiaus grįžta jau tik 0,0418 % pradinės akustinės energijos. Taigi, akustinis signalas, praėjęs 1 papildomą aliuminio sluoksnį prislopinamas 7,6 karto.
5. Eksperimentiniai matavimai parodė, kad naudojant fazuotas gardeles lengviausia defektus identifikuoti laminato pirmuose ir viduriniuose sluoksniuose. Tarpinės sritys signalo atspindžius slopina stipriausiai. Galima teigti, kad eksperimentas patvirtino teorinį modeliavimą. Geriausi rezultatai gauti panaudojus 5 MHz darbinio dažnio fazuotą gardelę, naudojant fokusuotą spindulį. Eksperimentiškai įvertinti didesnio ir mažesnio defektų skersmenys atitinkamai lygūs 23,2 mm ir 10,7 mm. 10 MHz fazuota gardelė gauti kiek prastesni rezultatai. Svarbu pažymėti, kad didinant keitiklio darbinį dažnį, signalo fokusavimas tampa nereikalingas.

Informacijos šaltinių sąrašas

1. Oliver Inderwildi, David King, Chris Carey, „Advanced aerospace materials: past, present and future“ („Aviation and the environment“ 2009 – 03; p. 22 – 27;
2. Davide Nardi, Morteza Abouhamzeh, Rob Leonard, Jos Sinke, „Detection and evaluation of pre - preg gaps and overlaps in Glare laminates“ (2018-02-22; p. 3 – 17;
3. https://www.agy.com/wp-content/uploads/2014/03/GLARE_Laminate-Aerospace.pdf, žiūrėta 2018 m. gegužės 2 d.
4. J. SINKE, „Manufacturing of GLARE Parts and Structures“(Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, „Applied Composite Materials 10“: 2003 m. p. 293–304;
5. Mohamed K. Hassan, Mohammed Y. Abdellah, S. K. Azabi, W.W. Marzouk, „Investigation of the Mechanical Behavior of Novel Fiber Metal Laminates“ (International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS Vol:15 No:03, 2015-06; p. 112 - 118;
6. R. A. Smith, „Composite defects and their detection“ (Structural Materials Centre, QinetiQ Ltd, Cody Technology Park, 2009 – 01, p. 2 – 11;
7. G. Fernlund, J. Wells, L. Fahrang, J. Kay and A. Poursartip, „Causes and remedies for porosity in composite manufacturing“(Department of Materials Engineering, The University of British Columbia, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 139 (2016) 012002, p. 1 –15;
8. Kaven Croft, Larry Lessard, Damiano Pasini, Mehdi Hojjati, Jihua Chen, Ali Yousefpour, „Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates“(Department of Mechanical Engineering, McGill University, National Research Council Canada, Institute for Aerospace Research, Aerospace Manufacturing Technology Center, 2011-01-25, p. 485-487;
9. T. Joffre, A. Miettinen, E. Wernersson, P. Isaksson, E. Gamstedt, „Effects of defects on the tensile strength of short-fibre composite materials“(Mechanics of Materials, 75 (August), 125-134. doi:10.1016/j.mechmat.2014.04.003;
10. Amafabia Daerefa-a Mitsheal, Montalvão Diogo, David-West Opukuro, Haritos George, „A Review of Structural Health Monitoring Techniques as Applied to Composite Structures“, 2017-02; p. 1 – 53;
11. <https://www.nap.edu/read/9251/chapter/6#23>, žiūrėta 2018 m. birželio 2 d.;
12. <https://imgur.com/gallery/d0mrd6P>, žiūrėta 2018 m. birželio 2 d.;
13. https://www.researchgate.net/figure/SEM-images-of-a-fibre-pull-out-and-b-interface-debonding-of-V-0-90-03_fig10_294423187, žiūrėta 2018 m. birželio 2 d.;
14. <https://www.fose1.plymouth.ac.uk/sme/MATS347/MATS347A4%20fracture.htm>, žiūrėta 2018 m. birželio 2 d.;
15. Yanjun Li, Jian Zhang, Jing Zhao, Jiandong Hu, „Research on Intelligent Tap Testing of Aviation Composite Material“, International Conference on Advanced Material Science and Environmental Engineering (AMSEE 2016); p. 44 – 47;
16. F. Aymerich, W. J. Staszewski, „Experimental Study of Impact-Damage Detection in Composite Laminates using a Cross-Modulation Vibro-Acoustic Technique“, 2010, Vol 9(6): 541–13 [1475-9217 (201011) 9:6;541–13 10.1177/1475921710365433], p. 541 – 551;
17. Cláudia T. T. Farias, Eduardo F. S. Filho, Ygor T. B. Santos, Matheus S. S. Araujo, Igor S. Ribeiro „Spectral Analysis of the propagation of Lamb Waves on Fibre-Metal Laminated Plates to detect

- and evaluate different defects”, 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, p. 1–10;
18. B.S. Ben, B.A. Ben, K.A. Vikram, S.H. Yang, „Damage Identification in Composite Materials Using Ultrasonic Based Lamb Wave Method”, <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.10.01,1>, p. 904–911;
 19. D.G. Aggelis, N.M. Barkoula, T.E. Matikas, A.S. Paipetis „Acoustic Structural Health Monitoring of Composite Materials: Damage Identification and Evaluation in Cross Ply Laminates Using Acoustic Emission and Ultrasonics”, doi:10.1016/j.compscitech.2011.10.011, p. 1127–1132;
 20. Stephan Gorges, Hartmut Brauer, Marek Ziolkowski, Matthias Carlstedt, Konstantin Weise, Reinhard Schmidt, Judith Mengelkamp, „Motion-induced Eddy Current Testing of Composite”, 19th World Conference on Non-Destructive Testing, 2016, p. 1-9;
 21. Andrejs Kovalovs, Sandris Rucevskis, Vladimir Kulakov, Mirosław Wesolowski, „Damage Detection in Carbon Fibre Reinforced Composites Using Electric Resistance Change Method”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 471 (2019) 102014 IOP, doi:10.1088/1757-899X/471/10/102014, p. 1-9;
 22. Akira Todoroki, Daichi Haruyama, Yoshihiro Mizutani, Yoshiro Suzuki, Tesuo Yasuoka „Electrical resistance change of carbon/epoxy composite laminates under cyclic loading under damage initiation limit”, Open Journal of Composite Materials, 2014, 4, 22-31, p. 22-29;
 23. Fatima Khathyri, Bachir Elkihel, Abd al motalib.Berrehili, Fabienne Delaunois, Imad Manssouri, „Detection and localization of defects in composite material using the non-destructive testing methods: Ultrasonic and Infrared Thermography”, International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development Issue 7, Vol. 2 (March 2017) Available online on http://www.rpublication.com/ijeted/ijeted_index.htm ISSN 2249-6149, p. 1-9;
 24. W. Swiderski, “IR thermography nondestructive testing methods of composite materials used in aerospace applications”, <http://dx.doi.org/10.21611/qirt.2015.0016>, p. 1-7