



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Andrius Norkevičius

**DEFEKTŲ VIETOS NUSTATYMAS ULTRGARSU KOMPOZITŲ IR
METALŲ SUJUNGIMUOSE**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Elena Jasiūnienė

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS KATEDRA

**DEFEKTŲ VIETOS NUSTATYMAS ULTRAGARSU KOMPOZITŲ
IR METALŲ SUJUNGIMUOSE**

Baigiamasis magistro projektas

Matavimų inžinerija (621H14001)

Vadovas

Doc. dr. Elena Jasiūnienė

Recenzentas

Doc. dr. Vytautas Knyva

Projektą atliko

Andrius Norkevičius

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

Andrius Norkevičius

(Studento vardas, pavardė)

Matavimų inžinerija 621H14001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Defektų vietos nustatymas ultragarsu kompozitų ir metalų sujungimuose“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. 05 14 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Andriaus Norkevičiaus** baigiamasis projektas tema „Defektų vietos nustatymas ultragarsu kompozitų ir metalų sujungimuose“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o 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.

Andrius Norkevičius

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Signalų apdorojimo katedra

Tvirtinu:
Katedros vedėjas V. Dumbrava

(data)

RMM-3 gr. magistranto Andrius Norkevičius
(vardas, pavardė)

**Tiriamąjo ir pedagoginio darbo 2013-2015m.m.
kalendorinis planas**

Tema : Defektų vietos nustatymas ultragarsu kompozitų ir metalų sujungimuose

Vadovas : doc. E. Jasiūnienė

Darbo etapo pavadinimas	Ivykdymo terminas
1. Tiriamasis darbas	
<i>1 semestras</i>	
1. Metodų, tinkamų skirtingų medžiagų sujungimų patikrai, analizė;	2013.12
2. Tinkamiausio ultragarsinio metodo skirtingų medžiagų sujungimų patikrai parinkimas.	2014.01
<i>2 semestras</i>	
1. Kompiuterinio modelio skirtingų medžiagų sujungimų patikrai sudarymas;	2014.04
2. Kompiuterinis modeliavimas, siekiant iširti įvairių faktorių įtaką defekto vietos nustatymo neapibrėžčiai;	2014.06
<i>3 semestras</i>	
1. Eksperimentinių matavimų eigos plano sudarymas ir aparatūros bei bandinių paruošimas;	2014.10
2. Eksperimentiniai matavimai;	
<i>4 semestras</i>	
1. Modeliavimo ir eksperimentinių rezultatų palyginimas ir analizė;	2015.02
2. Rezultatų apibendrinimas;	2015.03
3. Magistro tezių ruošimas;	2015.05
2. Pedagoginis darbas.	

Magistrantas / _____ /
(parašas)

Vadovas / E. Jasiūnienė /
(parašas)

Norkevičius, Andrius. Defektų vietos nustatymas ultrgarsu kompozitų ir metalų sujungimuose. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Elena Jasiūnienė; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros ir elektronikos katedra.

Kaunas, 2015. 75 psl.

SANTRAUKA

Šio darbo tikslas yra aptikti delaminacijų tipo defektus skirtingų medžiagų sudėtingos geometrijos sujungime bei nustatyti jų poziciją su tam tikru patikimumu. Tyrimo įgyvendinimui išskelti uždaviniai: išanalizuoti literatūrą ir parinkti tyrimo metodą, sukurti kompiuterinį tyrimo modelį, atlikti realius matavimus, atlikti neapibrėžties vertinimo procedūrą. Šiame darbe susiduriama su kompozitinės medžiagos nevienalytiškumo, metalo struktūrinių savybių, sudėtingos sujungimo geometrijos, skirtingų akustinių impedansų problemomis. Siekiant išspręsti šias problemas ir ištirti bandinį, literatūros analizės bei modeliavimo pagalba nustatyta, kad tyrimą reikia atlikti imersiniu impulsiniu aido būdu panaudojant aukšto dažnio (10 – 15 MHz) fokusuotuosius keitiklius. Remiantis modeliavimo rezultatais nustatyta, kad bandinį geriausiai tirti iš kompozitinės dalies pusės. Atliekant eksperimentinius matavimus rasti defektai ir sudėtingos geometrijos sujungimo vietoje (tarp kompozito sluoksnių), ir paprastame sujungime (tarp kompozito ir metalo ribos).

Norkevičius, Andrius. Determination of Position of Defects in Metal to Composite Joints Using Ultrasound. Final project of masters degree /supervisor doc. dr. Elena Jasiūnienė; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of electrical and electronics engineering.

Kaunas, 2015. 75 p.

SUMMARY

The objective of this paper is to find delaminations in a given specimen with complex joint of different materials and pinpoint their location with a set probability. To achieve a result the objective was divided in four tasks which are as follows: to choose a proper inspection method after analyzing literature resources, to create a computer model of the experiment which will allow to determine required parameters for experimental measurements, to make experimental measurements, to evaluate uncertainty of measurements with a chosen probability. Problems such as non homogenic materials, complex geometry of joint, difference between acoustic impedances were encountered in this task. Theoretical model was created to solve these problems. It was determined, that the best method to experimentally measure the specimen is to use immersion pulse echo method using high frequency focused transducers (10 – 5 MHz). Also it was determined, that the best position of the transducer would be, when scanning is initiated from composite side of the specimen. Experimental results showed, that it is possible to find defects in complex geometry joint and in regular joint.

Turinys

<i>ĮVADAS</i>	1
<i>1. NEARDOMŲJŲ METODŲ, TINKAMŲ DEFEKTŲ PAIEŠKAI KOMPOZITŲ IR METALŲ SUJUNGIMUOSE, ANALIZĖ</i>	9
1.1. <i>Tyrimo objektas bei su juo susijusios problemos</i>	10
1.2. <i>Perdavimo metodas</i>	12
1.3. <i>Impulsinis aido metodas</i>	12
1.4. <i>Defektų nustatymo metodas panaudojant Lambo bangas</i>	14
1.5. <i>Spektroskopija</i>	15
1.6. <i>Ultragarsiniai keitikliai</i>	17
1.7. <i>Apibendrinimas</i>	18
<i>2. KOMPIUTERINIS MODELIAVIMAS</i>	19
2.1. <i>Bandinio modelio aprašymas</i>	19
2.2. <i>Keitikliai ir metodas</i>	22
2.3. <i>Keitiklių spinduliuojamų laukų tyrimas</i>	22
2.4. <i>Optimalių parametru nustatymas eksperimentiniam matavimui panaudojant 10 MHz keitiklį</i>	27
2.5. <i>Optimalių parametru nustatymas eksperimentiniam matavimui panaudojant 15 MHz keitiklį</i>	35
<i>3. EKSPERIMENTINĖ DALIS</i>	42
3.1. <i>Ultragarso bangų greičio matavimas</i>	43
3.2. <i>Eksperimentiniai matavimai ieškant defektų</i>	46
3.3. <i>Apibendrinimas</i>	60
<i>4. NEAPIBRĖŽTIES ĮVERTINIMAS</i>	60
4.1. <i>Defekto pozicijos nustatymo neapibrėžtis x, y ašimis</i>	63
4.2. <i>Defekto pozicijos nustatymo neapibrėžtis z ašimi</i>	67
4.3. <i>Apibendrinimas</i>	71
<i>IŠVADOS</i>	72
<i>LITERATŪROS SĄRAŠAS</i>	73
<i>PRIEDAI</i>	76
<i>Priedas 1. 12th Student Scientific Conference on Electronics, Energy, Telecommunications and Automation E²TA – 2015, straipsnis „Defektų nustatymas ultragarsu kompozitų ir metalų sujungimuose“</i>	76

ĮVADAS

Paskutiniu metu labai plačiai pasaulyje naudojamas inovatyvus medžiagų sujungimo būdas kai sujungiama metalas ir kompozitinė medžiaga, norint pasiekti tam tikras mechanines savybes [1]. Bėgant laikui įvairios konstrukcijos silpnėja. To priežastis yra meteorologinių sąlygų bei mechaninių apkrovų poveikis: temperatūra, santykinė aplinkos drėgmė, slėgis, įtempimas, sunkio jėga, mechaninės vibracijos. Visi paminėtieji reiškiniai lemia laipsningą šios konstrukcijos degradaciją. Dėl šios priežasties iškilo būtinybė rasti tinkamą metodą sutvirtinti ir tuo pačiu padengti metalų konstrukcijas, kad kiek įmanoma būtų sumažintas korozinis poveikis bei atkurtas konstrukcijos patvarumas. Anglinio pluošto panaudojimas sutvirtinimui pastūmėjo šį metodą į platesnį naudojimą dėl galimybės išgauti lengvesnes, tvirtesnes konstrukcijų dalis. Šio dviejų skirtingų medžiagų sujungimo būdo esmė yra būtinas stiprus ryšys tarp pagrindinės ir sutvirtinančiosios medžiagų.

Defektai, tokie kaip delaminacijos, įtrūkimai, nepakankamas sujungimas labai dažnai tikrinami naudojant metodus besiremiančius ultragarsinių bangų panaudojimu. Pats didžiausias privalumas šių bangų panaudojimo metode atliekant matavimus yra tai, kad bandymai atliekami visiškai neardomuoju būdu. Nors ultragarsiniai metodai yra labai populiarūs tiriant kompozitų ir metalų sujungimus susiduriama su įvairiomis problemomis tokiomis kaip kompozitinės medžiagos nevienalytiškumas, metalo struktūrinės savybės. Taip pat dažniausiai susiduriama su medžiagomis, kurios turi didelį slopinimą bei bangų sklaidą [2]. Sudėtinga sujungimo geometrija kai sujungimuose patvarumo kokybei užtikrinti panaudojami spygliai, kabliukai ar kiti sudėtingos geometrinės formos surišėjai taip pat apsunkina matavimus. Skirtingi akustiniai impedansai duoda atspindį ir kai nėra defektų, kuris gali užgožti atspindį nuo defekto.

Šio darbo tikslas yra defektų vietos nustatymas kompozitų ir metalų sujungimuose. Pasiiekti norimą tikslą iškelti tokie uždaviniai:

- Atlikti metodų, tinkamų defektų vietos nustatymui kompozitų ir metalų sujungimuose analizę;
- Parinkti tinkamiausią metodą bandinio tyrimui;
- Sudaryti kompiuterinį modelį, kuris leistų įsitikinti ar pasirinktas metodas bus tinkamas naudoti defektų paieškai, bei leistų parinkti optimaliausius matavimo parametrus;
- Eksperimentiškai nustatyti defektų vietą sudėtingos geometrijos kompozito ir metalo sujungime;
- Įvertinti galimus neapibrėžčių šaltinius defekto vietos nustatymui.

1. NEARDOMŲJŲ METODŲ, TINKAMŲ DEFEKTŲ PAIEŠKAI KOMPOZITŲ IR METALŲ SUJUNGIMUOSE, ANALIZĖ

Šiais laikais tiriant objektus galima rinktis iš daugelio tyrimo metodų. Kiekvienas iš jų turi savo privalumų bei trūkumų. Šių bandymų taikymą pramonėje pagal sritis galima būtų suskirstyti į tokias dažniausiai sutinkamas grupes: aeronautikos sritis, auto – moto, vamzdynai, geležinkeliai, kasyba, agrikultūra, laivų statyba, metalų industrija.

Lentelėje 1.1 pateikta pagrindinių neardomųjų bandymų naudojamų pramonėje galimybės bei populiarumas. Remiantis 2013 metų duomenimis [3] pagal populiarumą kaip pagrindiniai metodai įvardijami: ultragarsiniai, magnetiniai, sūkūrinių srovių, rentgeno arba gama radiografija, dažų įsiskverbimo dar žinomas kaip kapiliarinis (1.1 lentelėje ultragarsinis metodas U.T., magnetinis M.T., sūkūrinių srovių E.T., radiografija R.T., kapiliarinis K.T.). Kaip matoma iš lentelės 1.1 duomenų patys universaliausi bei plačiausiai taikomi pramonėje šiuo metu yra ultragarsiniai metodai.

1.1 Lentelė. Pagrindinių neardomųjų bandymų naudojamų pramonėje galimybės [3].

Medžiaga	Defekto pobūdis						
	Paviršiniai defektai	Defektai arti paviršiaus	Vidiniai defektai ir nevienalytiškumai	Sukibimo, sulydymo kokybė	Nemetaliniai įterpti elementai, šlakas	Medžiagos kokybė	Storio, laminacijos matavimai
Kaltiniai, šampuoti metalai	M.T.	U.T., M.T.	U.T., R.T.		U.T., R.T.		U.T.
Metalų rūdos, ruošiniai	M.T.	U.T., M.T.	U.T.		U.T., M.T.		U.T.
Suvirinimas	U.T., M.T.	U.T., M.T.	U.T., R.T.	U.T., R.T.	U.T., R.T.		U.T.
Liejiniai	M.T.	U.T., M.T., E.T.	U.T., R.T.		U.T., R.T.	U.T.	U.T.
Nemetaliniai komponentai bei medžiagos	E.T., K.T.	U.T.	U.T., R.T.	U.T.	U.T.		U.T.
Ekspluatuojami metaliniai objektai	M.T.	U.T., E.T.	U.T., R.T.	U.T.	U.T., M.T.		U.T.

Eksplloatuojami nemetaliniai objektai	E.T., K.T.	U.T., E.T.	U.T., R.T.	U.T.	U.T., E.T.		U.T.
Aeronautikoje metaliniai komponentai	E.T., R.T.	U.T., M.T.	U.T., R.T.	U.T.	U.T., M.T.		U.T.
Aeronautikoje nemetalai	E.T., R.T., K.T.	U.T., R.T.	U.T., R.T.	U.T.	U.T.		U.T.

1.1. Tyrimo objektas bei su juo susijusios problemos

Atliekant tyrimus labai svarbu kuo daugiau išsiaiškinti apie tiriamąją medžiagą. Žinant bandomuosius objektus, šiuo atveju metalo sujungimas su kompozitu, galima maždaug numatyti su kokiomis problemomis gali tekti susidurti, bei nustatyti tinkamiausią būdą atlikti eksperimentinius bandymus.

Šiame darbe tiriamasis objektas yra sudarytas iš dviejų skirtingų medžiagų titano ir kompozito. Šios medžiagos yra ne tik suklijuotos, tačiau norint užtikrinti sujungimo tvirtumą sujungime panaudoti titano spygliai. Tokiu būdu užtikrinama sujungimo kokybė, bet apsunkinamas tyrimo procesas, kadangi spygliai yra sudėtingos geometrinės formos ir smarkiai įtakoja ultragarso bangų sklaidimą medžiagoje. Tiriamajame bandinyje didžiausia defektų atsiradimo tikimybė yra sujungime tarp metalo ir kompozito arba netoli ribos, pačiame kompozite tarp jo sluoksnių. Kompozitinę medžiagą galima būtų apibrėžti kaip kombinaciją kelių medžiagų, kurios kartu turi aukštesnės kokybės savybes negu tos medžiagos būtų naudojamos atskirai. Pagal ASM (*American Society for Metals*) organizaciją tai „makroskopinis dviejų ar daugiau skirtingų medžiagų sąryšis“.

Kaip žinoma ultragarsiniuose matavimuose labai svarbu žinoti tiriamosios medžiagos struktūrą, nes akustinių bangų greičiams šis veiksnys turi gana didelę reikšmę. Ypatingai sudėtingas ultragarso elgesys gali būti laminuotuosiuose kompozituose kaip pavyzdžiui anglies pluoštas (*CFPR*). Tiriant skirtingų medžiagų suklijavimus ultragarsu pagrindinė problema iškyla dėl didelio akustinio impedanso neatitikimo tarp sujungiamųjų elementų ir jungiančiosios medžiagos. Ypatingai sudėtinga tampa antroji riba tarp medžiagos, paprastai metalo, ir adhezinio sluoksnio dėl to, kad šioje riboje aidas yra stipriai slopinamas. Šis slopinimas atsiranda dėl slopinimo lygių adheziniame sluoksnyje ir dažnai yra užgožiamas sekančių aidų nuo pirmo sluoksnio ir pirmos ribos [4].

Taip pat labai svarbus įtakos veiksnys kompozitinėje sujungimo dalyje yra anizotropija. Anizotropija – vienalyčių medžiagų, daugiausia kristalų, fizikinių savybių (mechaninių, šiluminių, elektrinių, magnetinių, optinių) nevienodumas skirtingomis kryptimis, pvz. žėručio plokštelė skyla į

plonus lapelius tik išilgai tam tikros plokštumos [5]. Kompozitų anizotropiją ultragarsiniams matavimams savo darbe aptarė tyrėjas H. Cho [6]. Šiame darbe bandinys yra susidarytas iš metalo ir kompozito tai kompozitinė medžiaga turės savo kryptinį fizikinių savybių nepastovumą. Šis kryptingumas įtakoja ultragarso bangas tuo, kad skirtingomis ašimis ultragarso greitis, slopinimas, bangų difrakcija yra nevienodos. Šis kryptingumas paprastai yra suvedamas į vadinamąsias matricas, kurios nusako medžiagos struktūros mechanines savybes įvairiomis kryptimis [5]. Šios matricos yra sudaromos remiantis Huko dėsnio [5]:

$$\sigma = E\varepsilon; \quad (1.1.1)$$

čia; σ – įtempis; ε – santykinis pailgėjimas; E – Jungo modulis.

Bendrajį Huko dėsnį galima būtų apibūdinti kaip mažą kubą, išpjautą iš deformuojamo kūno ties rūpimu tašku taip, kad jo briaunos būtų lygiagrečios su koordinatinių ašimis x, y, z [7]. Po deformacijos briaunų ilgiai pakinta – padidėja arba sumažėja. Šių pokyčių priežastis – atsiradę įtempimai, kurie nusakomi parametrais: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$. Atsiradę įtempiai gali turėti savo simetrijos ašis [7]. Kai įtempiai yra dviejų ar trijų ašių (1.1.2 formulė), tai proporcingumas atsiranda tarp įtempių būvio ir deformacijų būvio, jeigu medžiagai galioja proporcingumo dėsnis. Minėtą proporcingumą išreiškia trys priklausomybės, vadinamos bendruoju Huko dėsnio [7]. 1.1.2 lygčių sistema gali būti pritaikyta ir medžiagom, kurių tamprumo savybės pasižymi dviejų ašių įtempimui, Tokiu atveju pašalinamas įtempis, kuris lygus nuliui [7]:

$$\begin{cases} \varepsilon_x [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]/E \\ \varepsilon_y [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]/E ; \\ \varepsilon_z [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]/E \end{cases} \quad (1.1.2)$$

čia; ε_x – santykinis pailgėjimas tam tikra kryptimi; σ_x – įtempis tam tikra kryptimi; ν – Puasono koeficientas; E – Jungo modulis.

Kai bandomieji objektai susideda iš vienos medžiagos metalo ar kompozito yra daug paprasčiau atlikti ultragarsinius matavimus norint surasti defektus. Šiuo atveju objektai yra sudėtiniai iš metalo ir kompozito paremto epoksidiniu surišimu. Pjezoelektriniuose keitikliuose esantys slopintuvai yra užpildyti epoksidine derva. Šio slopintuvo funkcija yra stipriai slopinti atgal atsklindantį signalą (10 – 40 dB/cm) [8], dėl šios priežasties kompozitinė bandinio dalis turės įtakos signalo amplitudei, bus mažesnis triukšmo ir signalo santykis, bei žemesnė signalo amplitudė [8]. Taip pat kompozitinės bandinio dalies mikrostruktūra apsunkina matavimus, kadangi galimas medžiagos

porėtumas, grūdėtumas padidina triukšmų įtaką. 1.2 lentelėje pateikiami duomenys apie naudojamą keitiklio dažnį ir defekto dydį, kurie yra dažniausiai sutinkami tyrėjų eksperimentų metu [8].

1.2 Lentelė. Dažnių diapazonai ir defekto storių ribos, dažniausiai sutinkamų defektų nustatymui ultragarsu metalų ir kompozitų sujungimuose.

Medžiaga	Dažnis	Defekto storis
Kompozitai	≈ 0,1 – 25 MHz	≈ 1 mm ± 0,2 mm
Klijuotosios struktūros	≈ 0,5 – 10 MHz	≈ 1 mm ± 0,1 mm

Yra įvairių metodų norint nustatyti adheziinių sujungimų kokybę. Juos galima būtų suskirstyti į tokias grupes [9]:

- Perdavimo;
- Impulsinis aido;
- Spektroskopija – dažnio srities tyrimas;
- Lambo bangų metodas.

1.2. Perdavimo metodas

Perdavimo metodas paprastai naudojamas kai yra galimybė prieiti prie tiriamojo objekto iš abiejų pusių. Pagrindinis trūkumas tai, kad keitikliai, kurių vienas veikia kaip siųstuvas, kitas kaip imtuvas, turi būti pozicionuojami tiksliai vienas virš kito, ypač tai yra svarbu kai naudojami fokusuotieji keitikliai. Šį trūkumą būna labai sunku ištaisyti jeigu bandinys būna didelių gabaritų, nagrinėjamu atveju plokštė. Metodas paremtas tuo, kad lyginama priimto signalo amplitudė su signalu, kurio amplitudė išmatuojama kai sujungimas yra geras.

1.3. Impulsinis aido metodas

Vienas iš plačiausiai naudojamų metodų yra impulsinis aido metodas. Šis matavimo būdas yra labai sėkmingai pritaikomas įvairaus pobūdžio ultragarsiniuose matavimuose. Jis paremtas tuo, kad į bandomąjį objektą yra išspinduliuojamos ultragarsinės bangos ir nuo nevienalytiškumų atsispindėję signalai yra priimami tuo pačiu keitikliu. Šį metodą skirtingų medžiagų sujungimo kokybei nustatyti nagrinėjo J. L. Rose ir kiti tyrėjai [10]. Jie padarė išvadą, kad delaminacijų tarp kompozito ir metalo paieškai sėkmingai galima pritaikyti šį metodą.

Pagrindinis impulsinio aido metodo principas yra atspindžio koeficientų vertinimas norint nustatyti kaip sukibusios medžiagos, panaudojus adheziinį sukibimo būdą. Gautas signalas yra lyginamas su pamatiniu. Jeigu signalo amplitudė tikrinamoje vietoje yra žemesnė nei nustatytasis

slenkstis tai tas taškas turės medžiagų sukibimo defektą. Norint tinkamai įvertinti sukibimo kokybę turi būti atsižvelgta į visų sudedamųjų medžiagų perėjimo ribas [11, 12]. Pagal 1.3.1 formulę galima nustatyti perėjimo ribos koeficientą. Šis koeficientas leidžia įvertinti kiek ultragarsinė banga pereis iš vienos aplinkos į kitą.

Perėjimo ribos atspindžio koeficientas [8]:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \quad (1.3.1)$$

čia, R – dviejų medžiagų sandūros atspindžio koeficientas bangai krentant statmenai; Z_1 – pirmos aplinkos akustinė pilnutinė varža; Z_2 – antros aplinkos akustinė pilnutinė varža.

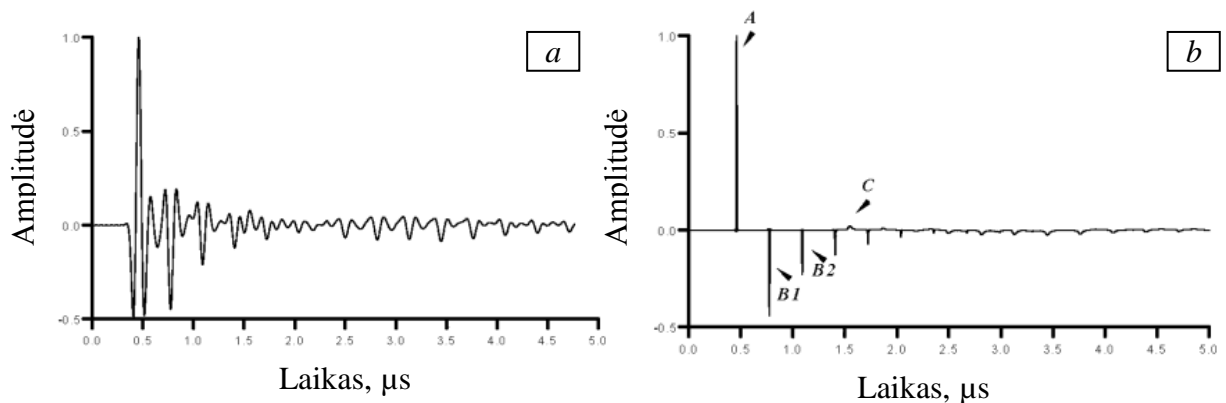
Aplinkos akustinė pilnutinė varža apskaičiuojama pagal 1.3.2 formulę [8]:

$$Z = \rho c; \quad (1.3.2)$$

čia; ρ – medžiagos, kurioje sklinda ultragarso banga tankis; c – ultragarso bangos greitis toje medžiagoje.

Impulsinio aido metodo privalumai bei trūkumai:

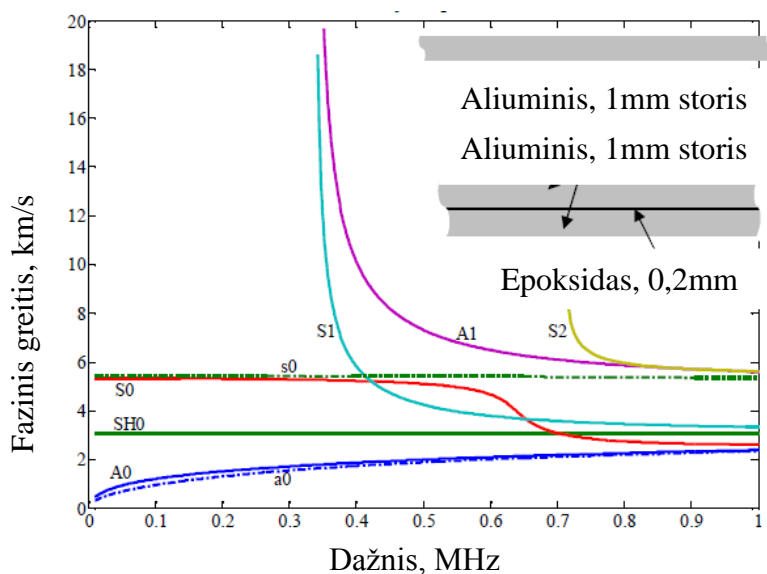
- Galima nustatyti defektus turint priėjimą tik iš vienos pusės.
- Galimybė prisitaikyti prie sudėtingesnės geometrijos objektų.
- Galimybė tirti didelių matmenų objektus.
- Paprastesnė įranga.
- Naudojant aukšto dažnio ultragarsinius keitiklius pvz. 10 MHz tiriant autoindustrijos pramonėje iškyla didelė triukšmų problema. Gali būti sunku išskirti nedidelės amplitudės aidą, kuris yra pažymėtas C raide, nuo adhezinio sluoksnio ir antros sudedamosios medžiagos ribos bendrame triukšmų fone (1.3.1 pav. a, b) [13].
- Dėl palygint stipraus signalo slopinimo sunku įvertinti antrosios ribos sukibimo kokybę tarp adhezinio sluoksnio ir medžiagos turint priėjimą iš vienos pusės.



1.3.1 pav. a) 1 mm aliuminio plokščių sujungimo naudojant 10 MHz dažnio keitiklį signalas [13]. b) To paties bandinio apdorotas signalas [13].

1.4. Defektų nustatymo metodas panaudojant Lambo bangas

Pagrindinis metodo privalumas, kad Lambo bangas galima siųsti didesniais nuotoliais kelių bangos ilgių storio bandiniuose. Tyrėjai P. K. Puthillath, Fei Yan ir kiti nagrinėjo persidengiančio sujungimo (*lapjoint*) tyrimą naudojant ištekančias bangas (*leakywaves*) [14]. Šis metodas remiasi tuo, kad stebima kaip bangos energija perduodama ar atspindima per geometrinį perdavimą – sujungimą. Renkantis bangų dažnį (1.4.1 pav.) svarbu atkreipti dėmesį į fazinius greičius. Žemiau pateiktame grafike matomos greičių ir dažnio priklausomybė 1mm storio aliuminio plokštėje ir dviejų aliuminio plokščių po 1 mm sujungimą 0,2 mm storio adheziniu sluoksniu (vieno sluoksnio plokštės kreivės pažymėtos brūkšniuota linija, junginio – tolygia) [15].



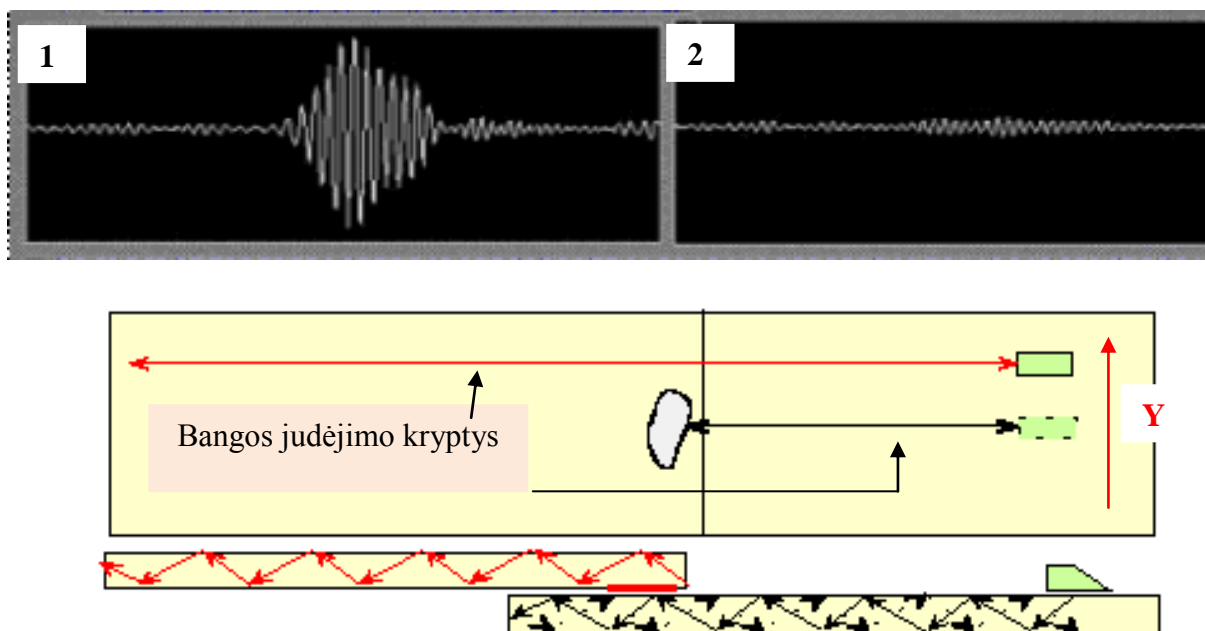
1.4.1 pav. Bangos fazių greičio dispersijos kreivės [15].

1.4.2 paveiksle testuojamas objektas buvo matuojamas generuojant 0,98 MHz dažnio S_0 Lambo modą (simetrinė moda) 30° kampu skenuojant Y kryptimi. Pirmas ir antras langeliai vaizduoja signalą gautą esant defektui ir kai jo nėra. Bangos formos su aukštesne amplitude atitinka defekto radimą arba energijos atspindį, kadangi perduodama energija nėra perduodama į kitą sujungimo plokštę. Ir yra atspindima atgal į keitiklį, kuris veikia kaip siūstuvus imtuvus. Kai geras sujungimas – energija yra perduodama į kitą sujungimo sluoksnį [16].

Taip pat labai svarbu nustatyti kampą, kuriuo bus generuojamos bangos. Nuo to kokiu kampu bus nustatytas keitiklis priklausys ir moda. Kampo nustatymui galima naudotis Snelijaus dėsnium, nurodytu 1.4.1 formulėje, kuris susieja bangos kritimo ir lūžio taškus [16]:

$$\theta = \sin^{-1}(V_l/V_{ph}); \quad (1.4.1)$$

čia; V_l – išilginės bangos greitis krintančios kampu; V_{ph} – apskaičiuotas norimos modos fazės greitis



1.4.2 pav. Skenavimo schema ir rezultatai [16].

Metodas panaudojant ištekančias bangas (*leakywaves*) labiau tinka tirti bandinius kai yra galimybė prieiti tik prie kurios nors vienos jungiamosios dalies. Sujungtosios medžiagos negali būti sukljuotos visu plotu viena su kita, nes tokiu atveju yra labai sunku sužadinti reikiamos modos bangą, kuri nebūtų sugerama adhezinio sluoksnio. Tyrėjai A. Mustafa, A. Chahbazir kiti tokiu būdu tyrė bandinius dviem būdais: perdavimo su dviem kampiniais keitikliais ir impulsinio aido metodu [16].

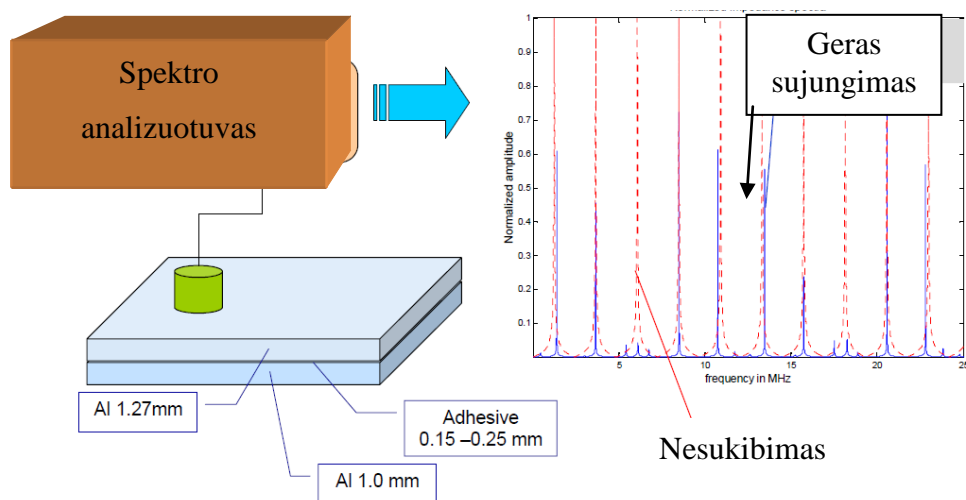
Metodo privalumai bei trūkumai:

- Matavimams galima naudoti įvairias Lambo modas priklausomai nuo to kokioje medžiagoje atliekami matavimai.
- Dėl baigtinių tiriamojo objekto matmenų galimi pašaliniai trikdžiai atsiradę nuo atspindžių susidariusių bangai atsispindėjus nuo tiriamojo objekto briaunos.
- Reikia gerai išmanyti apie sklindančias bangų modas bandinyje.
- Sudėtinga sužadinti bangas visiškai savo matmenimis persidengiančių objektų sujungimuose, norint panaudoti ultragarso energijos perdavimo/atspindėjimo būdą.

1.5. Spektroskopija

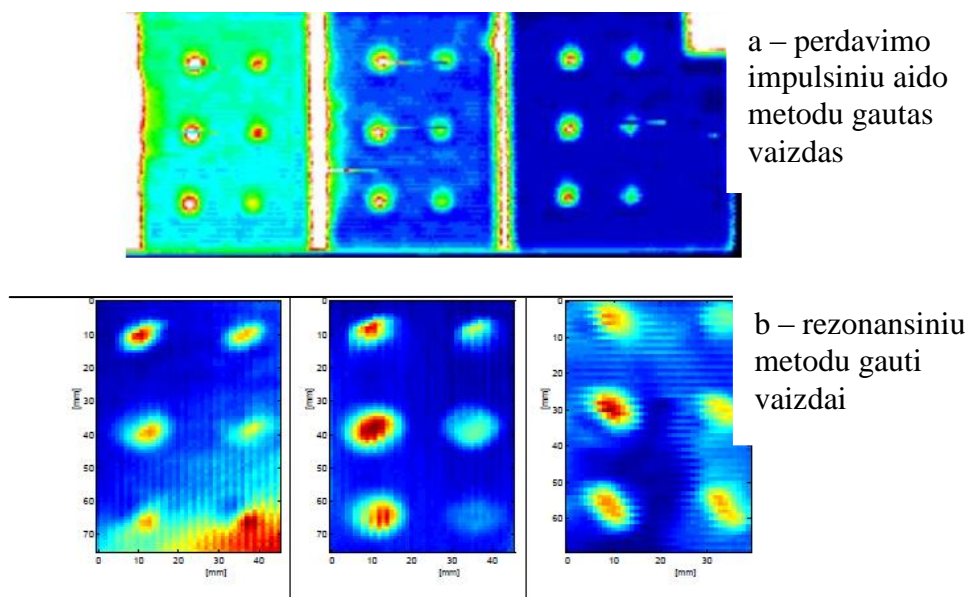
Ultragarstinė spektroskopija remiasi tuo, kad yra atliekama signalo Furjė transformacija ir bandinys analizuojamas remiantis gautų dažnių rezultatais. Paprastai tiriant šiuo metodu matavimo sistema susideda iš ultragarstinio keitiklio ir spektro analizuotuvo (1.5.1 pav.). Spektro analizuotuvus

atvaizduoja keitiklio dažnius. Rezonansas atsiranda tada, kai bandinyje telpa kartotinis pusbangių skaičius. Žinant, kad medžiagų rezonansinis dažnis priklauso nuo medžiagų sudėties ir ultragarso greičio medžiagoje galima lyginant įvairių bandinio vietų matavimo rezultatus nustatyti suklijavimo kokybę. Paprastai tariant, ultragarsinėje spektroskopijoje (pavyzdžiui naudojant Fokerio surišimo matavimo priemonę) panaudojant atitinkamą ultragarsinį keitiklį nuskenuojamas tiriamojo objekto paviršius ir užfiksuojami spektrai. Sukibimo ryšio įvertinimo stadijoje yra stebimi tokie gautojo spektro bruožai kaip centrinis dažnis ir amplitudės pikas prieš tai nustatytame dažnių plotyje [17, 1].



1.5.1 pav. Spektroskopijos matavimo prietaiso schema [17].

Adheziinių sujungimų kokybės nustatymui šiuo būdu savo tyrimuose nagrinėjo T. Stepinski, M. Jonsson [17]. Jie priėjo išvados, kad šiame metode svarbus parametras yra ultragarsinio keitiklio elektrinis impedansas priklausomai nuo dažnio. Tyrėjai savo darbe įrodė, kad rezonansiniu metodu galima išgauti kokybiškos rezoliucijos C atvaizdą [17] (1.5.2 pav.). Elektrinio impedanso tyrimą savo darbe nagrinėjo W. Lis ir J. Schmidt [18]. Jie aptarė pagrindinius ultragarsinių keitiklių impedanso matavimo metodus: matuojant tik amplitudžių įtampas ir matuojant amplitudžių įtampas bei fazės pokytį.



1.5.2 pav. C atvaizdo CFPR medžiagos tyrimo rezultatai: viršuje – perdavimo metodu gautas vaizdas, apačioje – tyrėjų naudoto metodo vaizdai (medžiagos storis iš kairės į dešinę 5 mm, 3 mm, 1 mm) [17].

Metodo privalumai bei trūkumai:

- Matuojant tirti dažnio sritį yra tiksliau negu laiko sritį, kadangi dėl laikinio diskretizavimo atsiranda paklaidos;
- Suklijuojančio sluoksnio storis bei savybės lemia rezonansų piko nepastovumą;
- Matavimų tikslumas priklauso nuo ultragarsinio keitiklio impedanso.

1.6. Ultragarsiniai keitikliai

Visi ultragarsiniai matavimai pirmiausiai prasideda nuo teisingo keitiklio parinkimo. Dėl šios priežasties šiuo metu gaminama įvairių ultragarsinių keitiklių: plokštieji statmenieji išilginių bangų keitikliai, fokusuotieji keitikliai, keitiklių gardelės, keitikliai skirti matavimams ore ar vandenyje ir t.t. Fokusuotieji keitikliai leidžia išgauti geresnę skiriamąją gebą. Dėl šios priežasties jie idealiai tinka tirti norint aptikti mažus arba bepradedančius formuotis defektus kas ypatingai svarbu didesnio saugumo reikalaujančiose srityse kaip aviacija, kosmonautika. Taip pat siauras fokuso zonos plotis bei gylis leidžia šiais keitikliais atlikti matavimus plonuose bandiniuose.

Lyginant fokusuotuosius keitiklius su paprastaisiais galima išskirti šiuos esminius skirtumus:

- Fokusuotųjų keitiklių pagrindinis parametras yra fokuso zonos plotas.
- Fokusuotieji keitikliai spinduliuoja siaurą lauką fokuso zonoje, kai nefokusuotieji tuo tarpu platesnį.

Fokusavimo zonos ilgis nusako atstumą, -6 dB lygyje, kuriame galima efektyviai tirti objektus. Šis parametras priklauso nuo keitiklio artimojo lauko atstumo bei normalizuotojo fokuso ilgio (1.6.1 formulė [19]):

$$F = N \cdot S_F^2 \left(\frac{2}{1+0,5 \cdot S_F} \right); \quad (1.6.1)$$

čia; N – artimojo lauko ilgis; S_F – normalizuotasis fokuso ilgis.

Fokusavimo zonos skersmens ilgis įtakoja keitiklio skiriamąją gebą. Teoriškai šį parametą -6 dB lygyje galima paskaičiuoti remiantis 1.6.2 formule [19]. Iš šios formulės matoma, kad fokusavimo skersmuo priklauso nuo keitiklio diametro, fokuso zonos, ultragarso bangos greičio medžiagoje, keitiklio dažnio:

$$FD_{(-6dB)} = 1,02 \frac{F \cdot V}{f \cdot D} = 0,2568 \cdot D \cdot S_F; \quad (1.6.2)$$

čia; F – fokuso zonos ilgis; V – ultragarso greitis medžiagoje; f – dažnis; D – keitiklio diameteras; S_F – normalizuotas fokuso ilgis.

1.7. Apibendrinimas

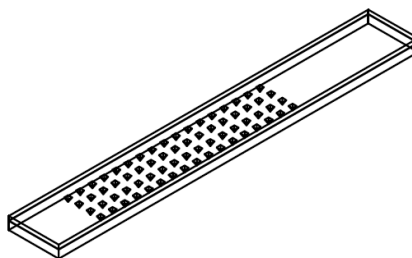
Išnagrinėjus literatūrą nustatyta, kad tiriant metalų ir kompozitų sujungimus dažniausiai naudojami aukštesnio dažnio keitikiai ($10 - 15$ MHz) panaudojant impulsinį aido metodą, tačiau literatūros apžvalgoje nustatyta, kad dažniausiai tyrėjai nagrinėjo nesudėtingos geometrinės formos sujungimus. Impulsinis aido metodas daug labiau tinka tirti defektus esančius sudėtingos geometrinės formos sujungimuose, kadangi statmenai spinduliuojant ultragarso bangas tiriamojo bandinio atžvilgiu bangos statmenai sklis ir į delaminaciją, dėl ko turėtų būti gaunamas stipresnis atspindžio nuo defekto signalas. Skirtingai nei impulsiniame aido metode tiriant panaudojant Lambo bangas šioms sklisti bandinyje sunkumų sudarytų didelis slopinimas bandinyje bei sujungimo geometrinė forma, dėl kurios atsirastų per daug nereikalingų atspindžių. Žinant, kad bandinys yra plonas (6 mm) bei delaminacijoms aptikti reikalinga aukštesnė skiriamoji geba nuspręsta naudoti fokusuotuosius keitikius. Spektroskopijos metodas atmestas dėl to, kad šis neleidžia nustatyti defekto pozicijos gylio atžvilgiu.

2. KOMPIUTERINIS MODELIAVIMAS

Šios darbo dalies tikslas yra sukurti modelį, kurio pagalba būtų įmanoma nustatyti pačius tinkamiausius parametrus (keitiklio parametrai, pozicionavimas), kad būtų įmanoma aptikti defektus realiame bandinyje. Taip pat gauti rezultatai leis įvertinti ar parinktas tyrimo metodas bus tinkamas naudoti realiuose matavimuose.

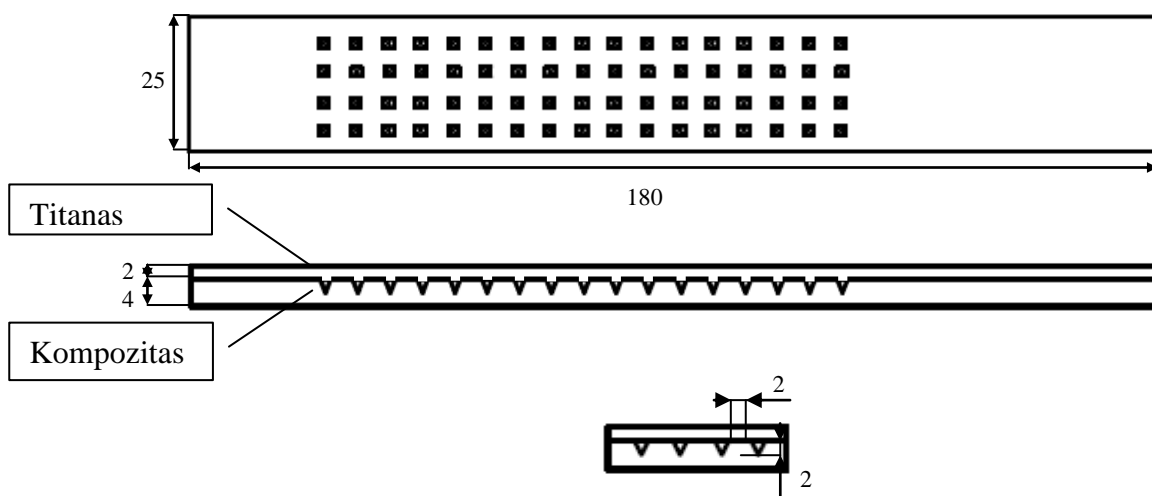
2.1. Bandinio modelio aprašymas

Realus bandinys yra sudarytas iš titano ir anglies pluošto kompozito. Metalinė tiriamojo objekto dalis yra 2 mm (2.1.1 pav. dalis su spygliais), kompozitinė dalis yra 4 mm storio, kuri susideda iš 16 sluoksnių anglies pluošto (2.1.2 pav.).



2.1.1 pav. Supaprastintas bandinio modelis.

Bandinio ilgis ir plotis atitinkamai yra 180 mm ir 25 mm (2.1.2 pav.), tačiau pats svarbiausias šiame darbe parametras yra tiriamo objekto storis ir sujungiamųjų spyglių matmenys (skersmuo 2 mm, ilgis 2 mm). Tai galima pagrįsti tuo, kad sudėtinga bandinio vidinė forma turės įtakos ultragarso bangai ir ši skirtingai reaguos lygioje ir spygliuotoje vietoje. Be to ultragarso bangos slopimas priklausys ir nuo objekto, kuriame šios sklinda, storio.



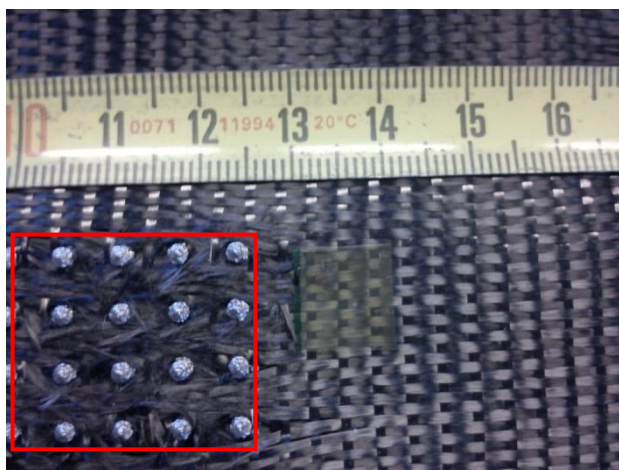
2.1.2 pav. Modelio matmenys, mm.

Sujungimui naudotas komercinis epoksidas „Araldite 5052“ ir kompozitinės dalies viduje esantys metaliniai spygliukai (2.1.3 pav. pažymėta apibrėžimu). Atskiri anglies pluošto sluoksniai yra supintosios struktūros. 2.1 lentelėje pavaizduotos pagrindiniai sudedamųjų bandinio medžiagų duomenys, kurie yra naudojami modelio aprašymui programoje. Norint įgyvendinti bandinio modelį kompiuterinėje aplinkoje šis supaprastintas sukuriant 2D modelį.

2.1 Lentelė. Pagrindiniai ultragarso duomenys bandinio medžiagose.

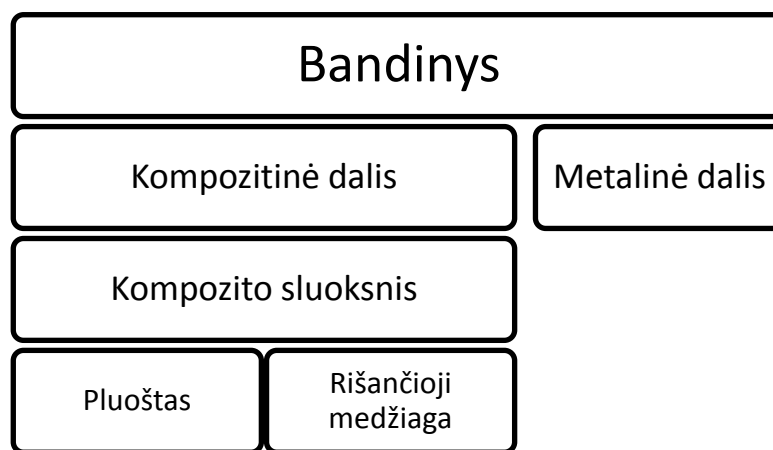
Medžiaga	Titanas	Anglies pluoštas
Tankis prie 20 ⁰ C	4,54 g/cm ³	1,494 g/cm ³
Išilginių bangų greitis	6100 m/s	*2400 m/s

* vidutinis greitis



2.1.3 pav. Kompozitinės dalies tvirtinimo sandara.

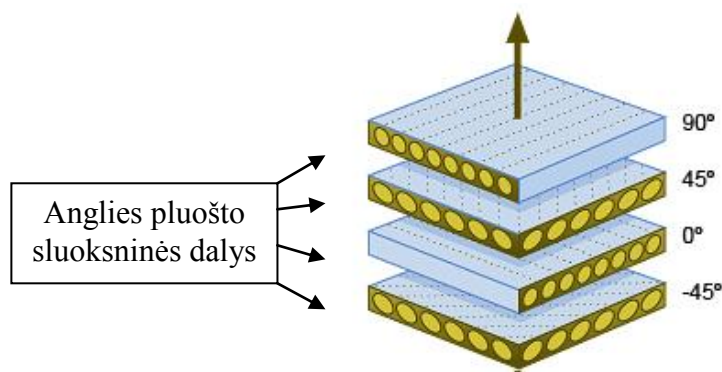
Kaip buvo aptariama teorinėje dalyje 1.1. poskyryje, kompozitinės medžiagos gali būti suskirstytos į kelias rūšis pagal jų vidinių įtempių ir standumo priklausomybes įvertinant mechaninį poveikį triašėje erdvėje. Apie tiriamojo objekto kompozitinę dalį žinoma, kad tai yra anglies pluošto kompozitas, kuris yra supintosios struktūros ir susideda iš 16 sluoksnių. Į šią kategoriją įeina kompozito simetrija, sluoksnių kampinis išsidėstymas ir pan. Žemiau esančioje diagramoje pateikiama viso bandinio aprašymo CIVA aplinkoje diagrama (2.1.4 pav.).



2.1.4 pav. Bandinio aprašymo CIVA aplinkoje diagrama.

Pagal pateiktą diagramą (2.1.4 pav.) aprašomas tiriamasis objektas. Skiltyje „Bandinys“ nurodoma objekto geometrija bei pagrindinės dedamosios, kuriose bus aprašoma sudedamosios medžiagos charakteristikos.

Skiltyje „Kompozitinė dalis“ nurodoma kompozitinės bandinio dalies sluoksnių skaičius (šiuo atveju turime 16 sluoksnių ir kadangi bendras kompozito storis 4 mm, tai vieno sluoksnio storis bus 0,25 mm), jų pasukimo kampas. bei kompozitinės dalies tipas. Pasirinktas medžiagos tipas – daugiasluoksnis homogeninis kompozitas (2.1.5 pav.). Ši charakteristika nustatyta atsižvelgiant į bandinio atitikimą programos specifikacijai.



2.1.5 pav. Daugiasluoksnio homogeninio kompozito pavyzdys.

Grafoje metalinė dalis (2.1.4 pav.) apibūdinamas bandinyje esantis metalas (2.1 Lentelė). Kadangi bandymai bus atliekami ultragarso bangas generuojant statmenai, tai svarbiausias parametras bus išilginių bangų greitis, kuris titane yra 6100 m/s, o kompozite 2400 m/s. Skiltyje „Kompozito sluoksnis“ aprašoma pagrindinės kompozito charakteristikos, tokios kaip pluošto tankumas bei pluošto diametras.

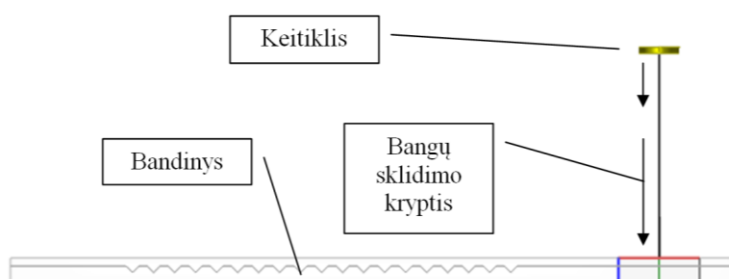
2.2. Keitikliai ir metodas

Įvertinant bandinį bei praktikoje naudojamus keitiklių parametrus išsiaiškinta, kad tiriant panašius objektus yra naudojami aukšto dažnio keitikliai. To priežastis yra gana plonas bandinio storis bei reikalinga didesnė skiriamoji geba norint aptikti delaminacijas, todėl darbe planuojama naudoti 10 MHz ir 15 MHz vieno elemento statmenuosius fokusuotuosius keitiklius. Šiame darbe parinkti du skirtingų dažnių keitikliai bus naudojami, tinkamesnio dažnio nustatymui tiriant duotąjį bandinį. Išsamesnė naudojamų keitiklių informacija pateikiama 2.2 lentelėje.

2.2 Lentelė. Naudojamų keitiklių kompiuteriniame modeliavime parametrai.

	Olympus V327 – SU	Olympus V328 – SU
Naudojamas dažnis	10 MHz	15 MHz
Keitiklio skersmuo	10 mm	10 mm
Lęšiuko paviršiaus išlinkimas	24,5 mm	22,9 mm
Elemento forma	apvalus	
Fokusavimo taškas	50,9 mm	

Įvertinus bandinio sandarą priimtas sprendimas naudoti impulsinį aido metodą. Šiuo būdu išilginės ultragarso bangos sklis statmenai bandinio paviršiui (2.2.2 pav.). Šis metodas pasirinktas siekiant išvengti atsirandančių ultragarso bangos pokyčių dėl anizotropijos kompozite žadinant skersines bangas. Taip pat žinant, kad defektai yra išsidėstę plokštumose tarp metalo ir kompozito bei anglies pluošto laminato sluoksniuose, leidžia pasirinkti šį tyrimo būdą.



2.2.2 pav. Matavimo schema.

2.3. Keitiklių spinduliuojamų laukų tyrimas

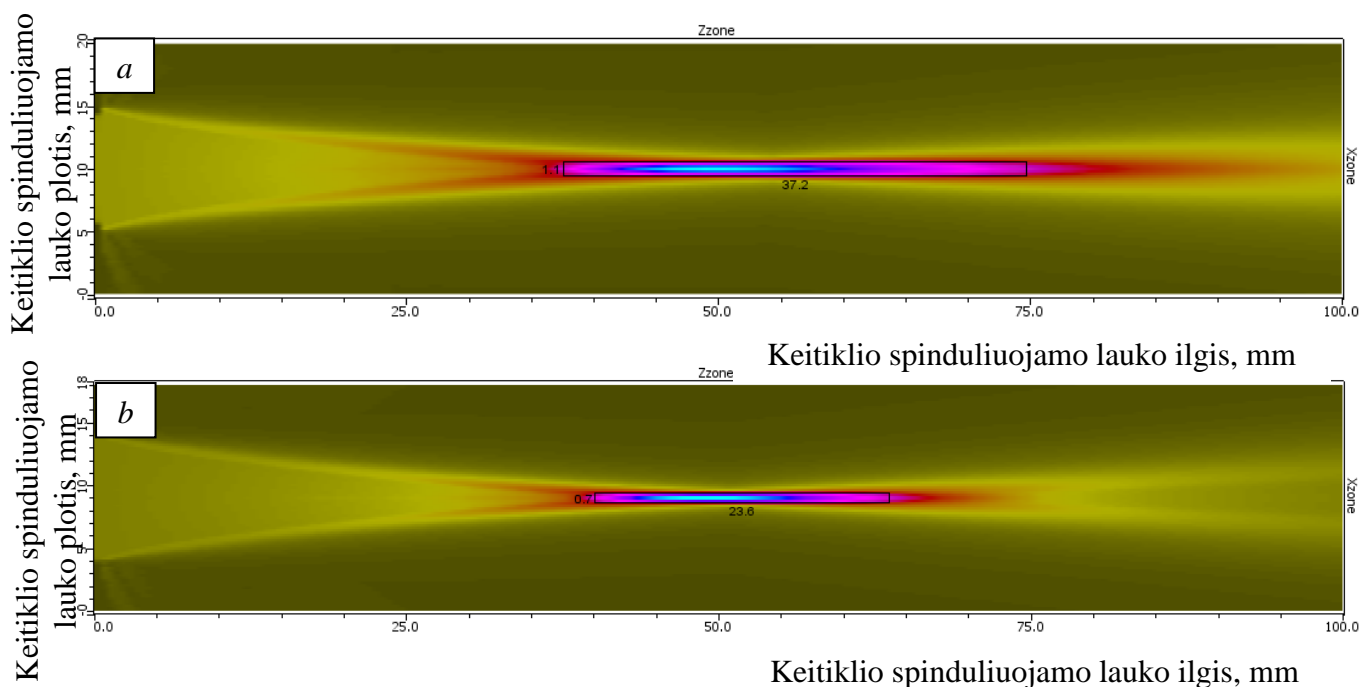
Keitiklio pozicionavimas parenkamas atsižvelgiant į jo pobūdį, tyrimo aplinkybes bei tiriamąsias medžiagas. Šiuo atveju naudojami fokusuotieji ultragarsiniai keitikliai, dėl šios priežasties tyrimo metu jie bus pozicinuojami tam tikru atstumu nuo tyrimo objekto. Įvertinus oro ir vandens akustines savybes (2.3 Lentelė) priimtas sprendimas naudoti imersinį metodą.

2.3 Lentelė. Medžiagų akustinės savybės.

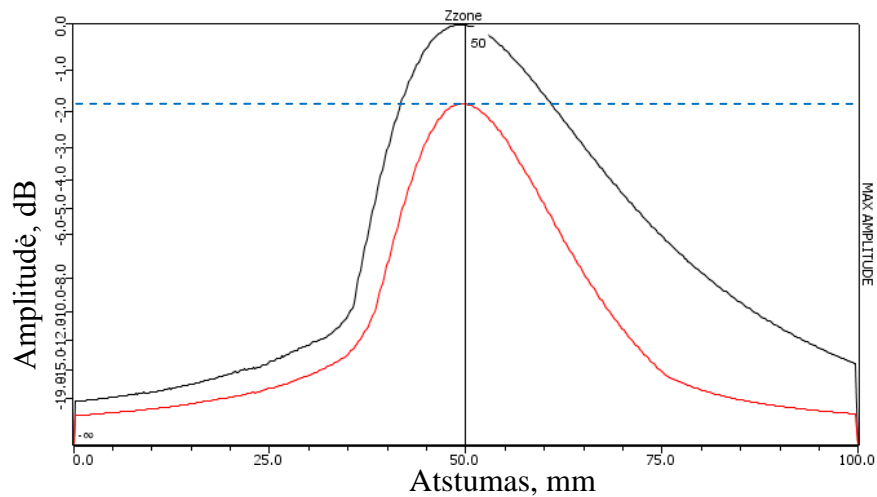
Medžiaga	Garso greitis medžiagoje, m/s	Medžiagos tankis, kg/m^3	Akustinė varža, $\text{kg/s/m}^2 \times 10^6$
Oras	333	0,0012	0,0004
Vanduo	1480	1000	1,48

Dėl naudojamų keitiklių aukštų dažnių sklisdamas oru signalas praranda didesnę dalį amplitudės negu sklisdamas vandeniui. Dėl to reikia surasti 15 MHz bei 10 MHz keitiklių poziciją vandenyje, kad į tiriamojo objekto kompozito ir metalo ribą būtų spinduliuojamas maksimalios amplitudės signalas.

Analizuojant sumodeliuotus 10 MHz ir 15 MHz keitiklių laukus vandens terpėje 0 – 100 mm atstume skirtingų dažnių keitiklių fokusavimo zona skiriasi (2.3.1 *a, b* pav.). 10 MHz fokuso zona –6 dB lygyje yra platesnė (1,1 mm) bei ilgesnė (37,37 mm) lyginant su 15 MHz (atitinkamai plotis ir ilgis – 0,7 mm bei 23,6 mm). Taigi iš 2.3.1 paveiklo matoma, kad aukštesnio dažnio keitiklio fokuso zona mažesnė, tačiau dėl šios priežasties galima aptikti mažesnių matmenų defektus. 2.3.2 paveiksle matyti, kad vandenyje 15 MHz keitiklio signalo amplitudė yra žemesnė –1,8 dB negu 10 MHz. Įvertinant tai galima teigti, jog bandinyje signalas taip pat bus labiau slopinamas. Iš 2.3.2 paveiklo matoma, kad 10 MHz ir 15 MHz keitiklių fokuso taškas yra 50 mm atstumu nuo keitiklio.



2.3.1 pav. *a)* 10 MHz keitiklio laukas (vandenyje). *b)* 15 MHz keitiklio laukas (vandenyje).



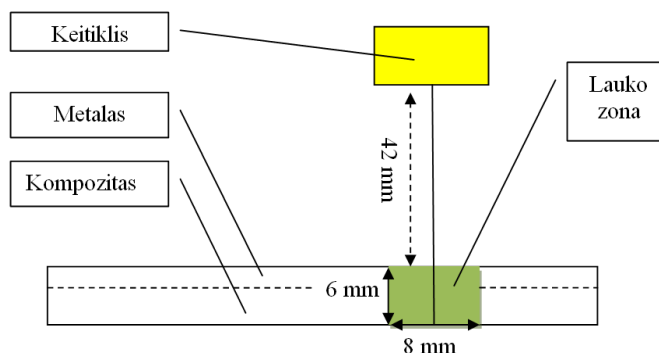
2.3.2 pav. 10 MHz (juoda linija) ir 15 MHz keitiklių (raudona linija) lauko vandenyje amplitudės išilgai keitiklio ašies.

Šiame darbe yra norima fokusuoti į metalo bei kompozito sujungimo ribą, kadangi šioje vietoje yra didžiausia defektų atsiradimo tikimybė. Fokusuotųjų keitiklių fokuso nuotolis priklauso nuo to kokia yra tiriamoji medžiaga. Tai lemia ultragarso greičių skirtumas vandenyje ir medžiagoje, dėl šios priežasties prieš pozicionuojant tokio tipo keitiklį reikia įvertinti atstumo pokytį pagal 2.3 formulę [19]:

$$l_V = F - l_m (c_m / c_V); \quad (2.3)$$

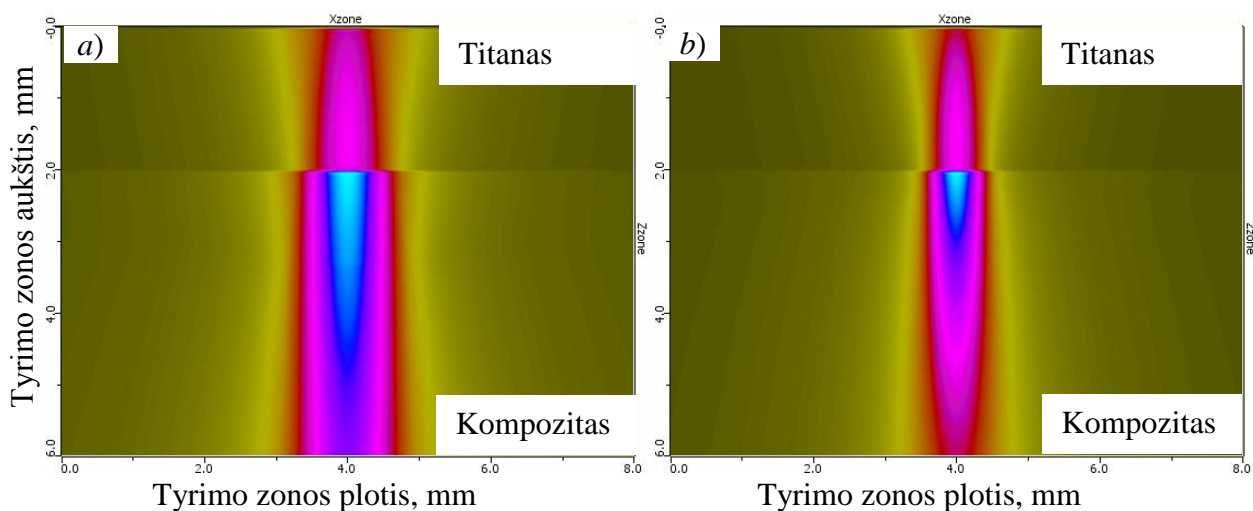
čia; l_V – vandens kelias; F – keitiklio fokuso nuotolis; l_m – gylis bandinyje, kuriame norima fokusuoti; c_m – ultragarso greitis bandinyje; c_V – ultragarso greitis vandenyje.

Tiriamasis bandinys yra sudarytas iš dviejų skirtingų medžiagų – titano ir anglies pluošto sluoksnių. Dėl šios priežasties reikia nustatyti, iš kurios pusės geriausiai išeitų aptikti defektus. Fokusuotųjų keitiklių panaudojimas reikalauja, kad būtų nustatytos keitiklio pozicijos kiekvienos sudedamosios medžiagos atžvilgiu pagal 2.3 formulę. Apskaičiavus atstumus gauta, kad tiriant iš titano pusės keitiklis turi būti 42 mm atstumu nuo bandinio paviršiaus. Tiriant iš kompozito pusės – 44 mm atstumu. Keitiklio laukas modeliuojant iš metalo pusės buvo sumodeliuotas 0,02 mm žingsniu 6x8 mm plote, keitiklio atstumas iki bandinio 42 mm (2.3.3 pav.).

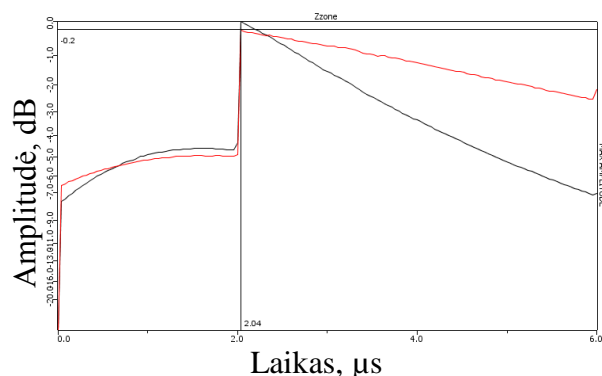


2.3.3 pav. Lauko pasiskirstymo matavimo schema modeliuojant iš metalo pusės.

Palyginus skirtingų keitiklių laukų duomenis bandinyje (2.3.4 *a, b* pav.) galima pastebėti, kad 10 MHz (2.3.4 *a* pav.) ultragarsinio lauko fokuso zona kompozitinėje dalyje, kur bus defektai yra platesnis bei ilgesnis nei sukuriamas 15 MHz keitiklio (2.3.4 pav. kuo šviesesnė mėlyna spalva tuo stipresnis signalas), tačiau kompozitinėje dalyje pastebimas didesnis bangos slopimas naudojant 15 MHz dažnį (2.3.5 pav.), nors metalo – kompozito riboje 15 MHz amplitudė yra $-0,2$ dB aukštesnė. Verta pabrėžti, kad dėl 15 MHz keitiklio siauresnio spindulio (2.3.4. *b* pav.) bandinyje įmanoma aptikti smulkesnius defektus. Lyginant suskaičiuotus laukus iš metalo pusės (2.3.4 pav.) galima teigti, kad patogesnis naudoti būtų 10 MHz keitiklis dėl to, kad jis spinduliuoja stipresnę signalą gilesniuose kompozito sluoksniuose.

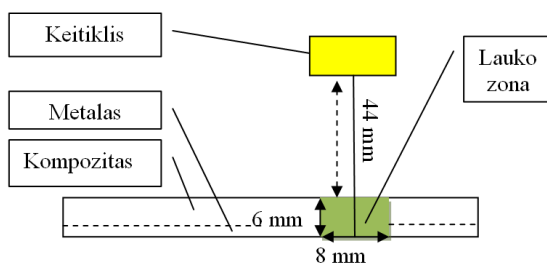


2.3.4 pav. *a)* 10 MHz keitiklio laukas bandinyje iš metalo pusės. *b)* 15 MHz keitiklio laukas bandinyje iš metalo pusės.



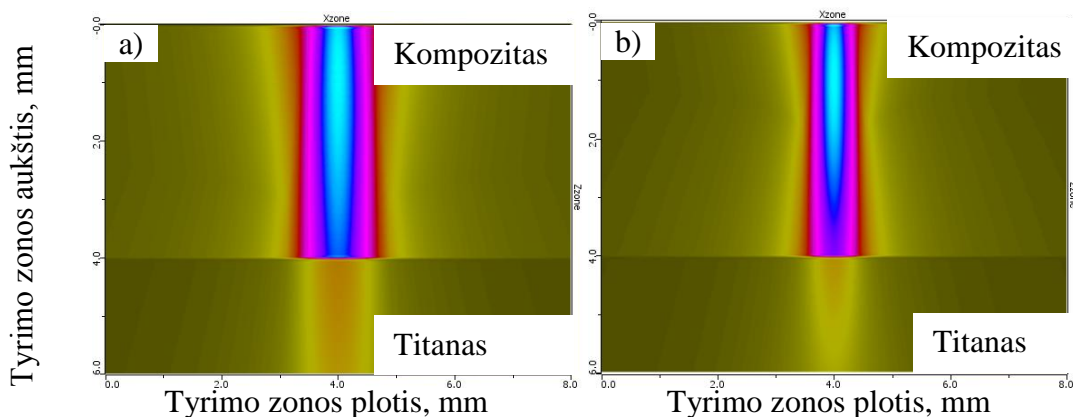
2.3.5 pav. 10 MHz (raudonas grafikas) ir 15 MHz (juodas grafikas) keitiklių palyginimas pozicionuojant iš metalo pusės.

Modeliuojant lauką iš kompozito pusės skaičiavimo zona buvo tokio pačio ploto kaip ir skaičiuojant iš metalo pusės (2.3.6 pav.). Šiuo atveju pakeistas keitiklio atstumas iki bandinio. Įvertinus fokusavimo atstumo priklausomybę nuo skirtingų ultragarso greičių vandenyje ir kompozite (2.3 formulė) nustatyta, kad keitiklis turi būti pozicionuojamas 44 mm atstumu nuo bandinio paviršiaus norint fokusuoti bangą ties kompozito – metalo riba.

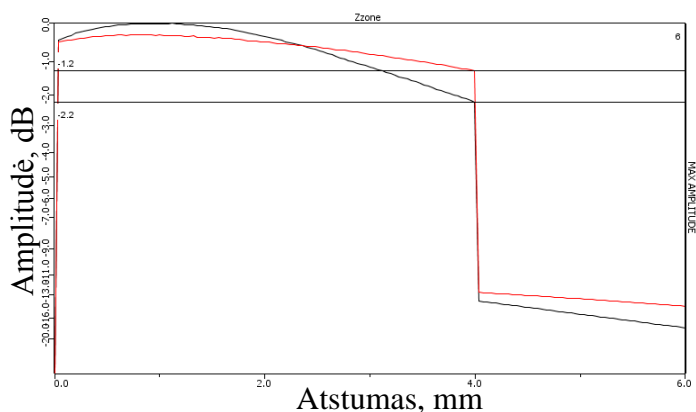


2.3.6 pav. Lauko pasiskirstymo matavimo schema modeliuojant iš kompozito pusės.

Pozicionuojant keitiklius iš kompozitinės bandinio pusės didžiausia signalo dalis yra atspindima dėl metalo ir kompozito akustinių varžų nesuderinamumo (2.3.7 pav.). Kaip matoma modelyje naudojant 10 MHz keitiklį ties kompozito – metalo riba amplitudė yra –1 dB aukštesnė negu 15 MHz (2.3.8 pav.).



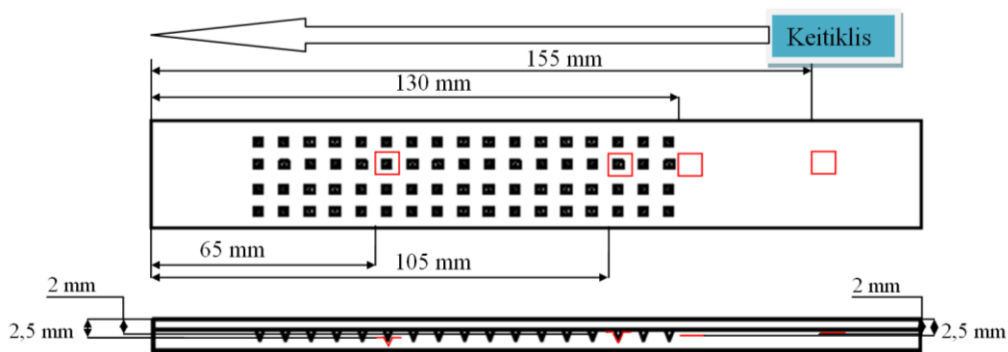
2.3.7 pav. a) 10 MHz keitiklio laukas bandinyje. b) 15 MHz keitiklio laukas bandinyje.



2.3.8 pav. 10 MHz (raudonas grafikas) ir 15 MHz (juodas grafikas) keitiklių palyginimas pozicionuojant iš kompozito pusės.

2.4. Optimalių parametrų nustatymas eksperimentiniam matavimui panaudojant 10 MHz keitiklį

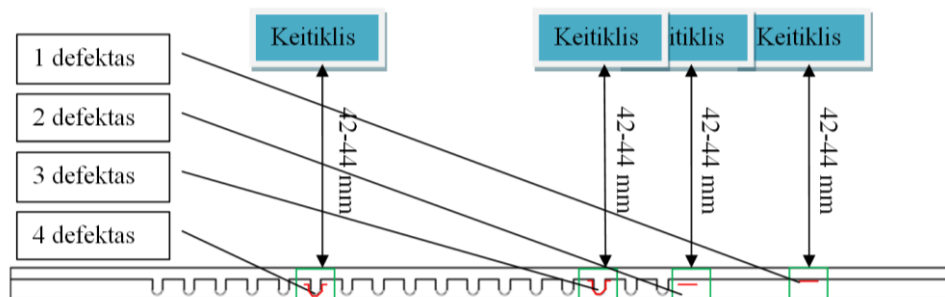
Literatūroje teigiama, kad dažniausiai pasitaikantis defektas anglies pluošto kompozitinėse medžiagose būna delaminacija [20]. Paveiksle 2.4.1 nurodomos esamų delaminacijų defektų pozicijos bandinyje. Dvi iš jų yra lygioje zonoje, pirmoji 155 mm atstumu nuo bandinio kairiojo krašto ties kompozito – metalo riba (2 mm gylyje), o antrasis – 130 mm atstumu kompozite tarp jo sluoksnių (2,5 mm gylyje). Spygliuotoje zonoje esantis trečiasis ir ketvirtasis defektai atitinkamai išsidėstę 105 mm atstume ir riboje (2 mm gylyje) bei 65 mm atstumu ir tarp kompozito sluoksnių (2,5 mm gylyje).



2.4.1 pav. Defektų pozicijos ir atstumai bandinyje.

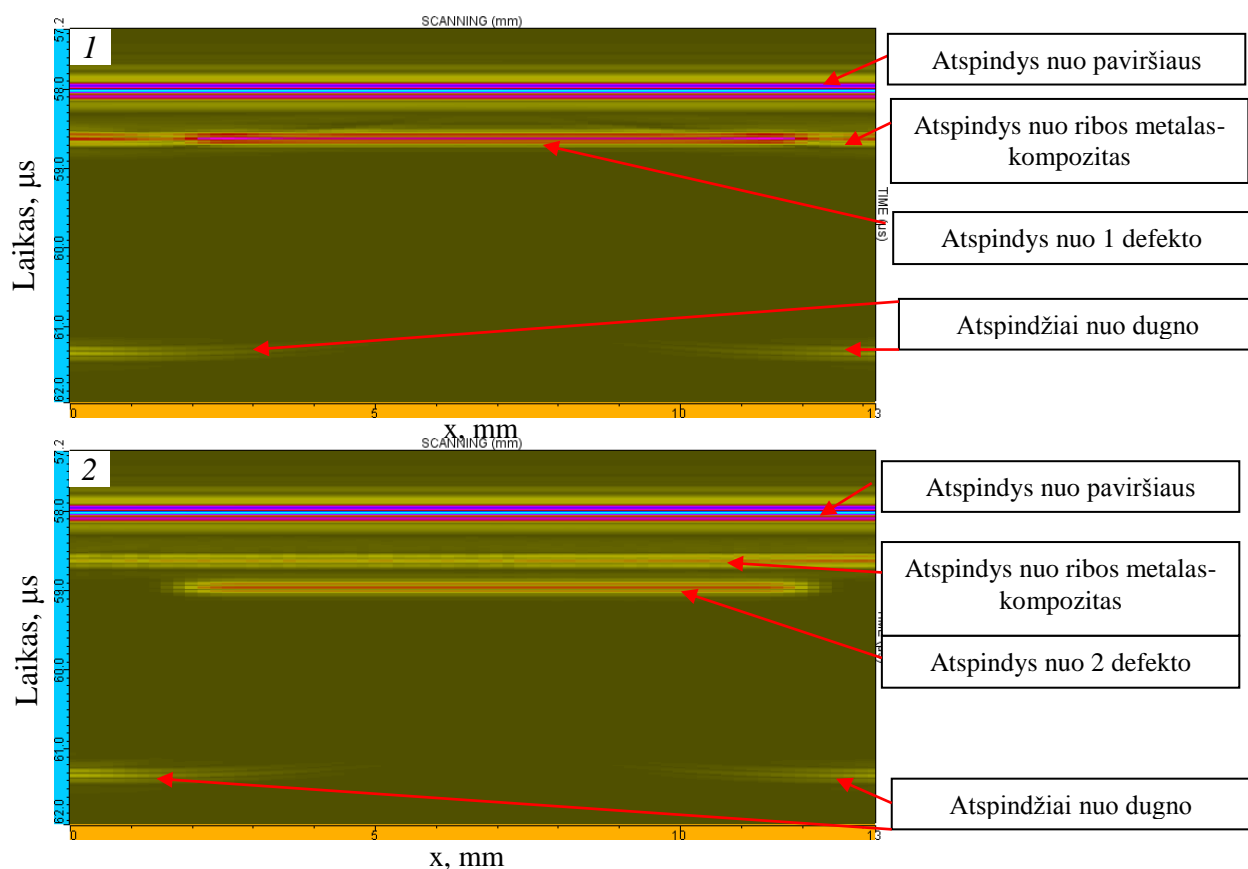
Bandinys skenuotas 0,01 mm žingsniu 13 mm pločio bei 6 mm aukščio plote, keturiose vietose (2.4.2 pav.). 2.4.3 paveiksle pavaizduotuose rezultatuose vertinta atspindžiai nuo paviršiaus, aplinkų ribų, dugno bei slopinimas. Norint nustatyti, iš kurios pusės pozicionuojant keitiklį būtų gauti didesnės amplitudės atspindžiai nuo defektų modeliavimas atliktas iš metalo pusės ir iš kompozito pusės. Taip pat pateikiami modeliavimo atvaizdai nevertinant atspindžio nuo bandinio paviršiaus, kad

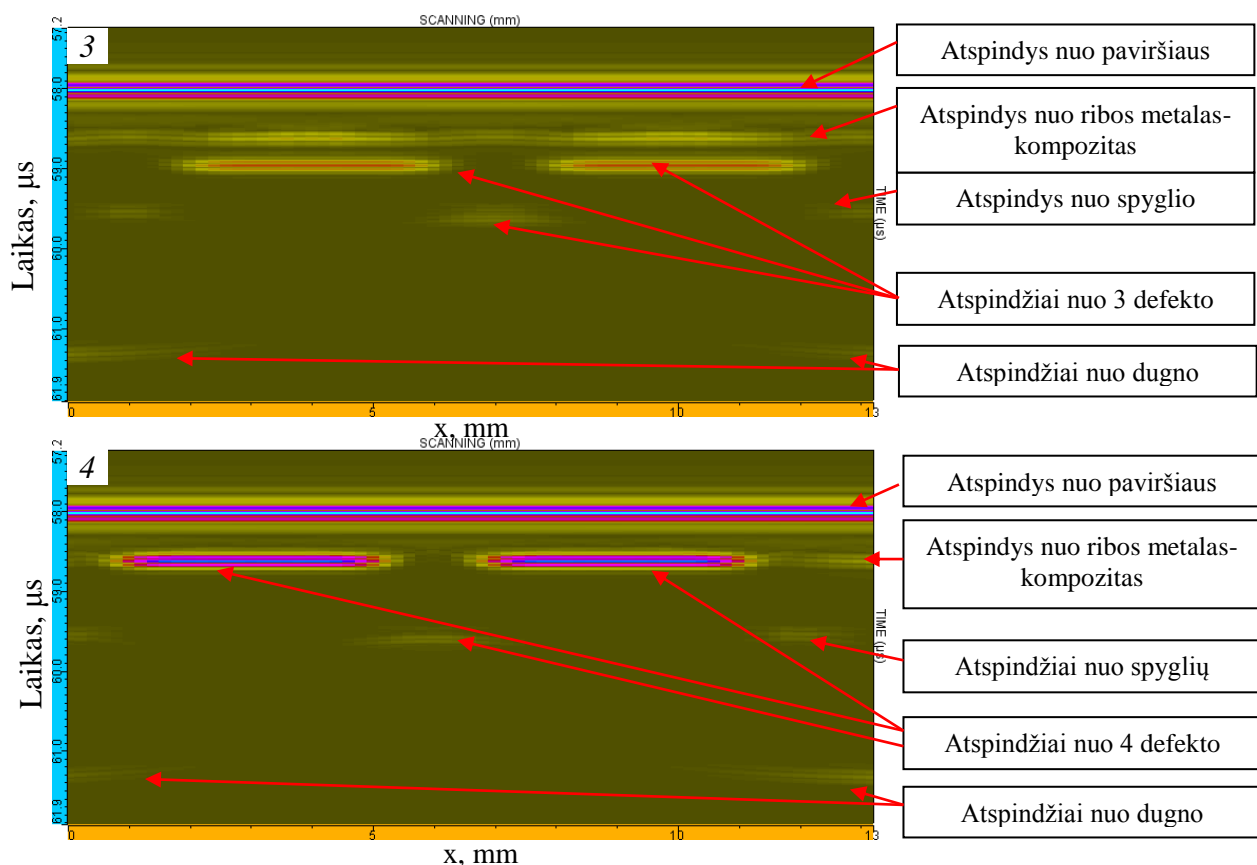
būtų galima įvertinti atspindžius normuotus defekto atžvilgiu (2.4.3 pav., 2.4.4 pav.). Tokiu būdu galima nustatyti kiek defekto atspindys yra stipresnis negu nuo dugno ir metalo bei kompozito ribos.



2.4.2 pav. Skenavimo 10 MHz keitikliu schema.

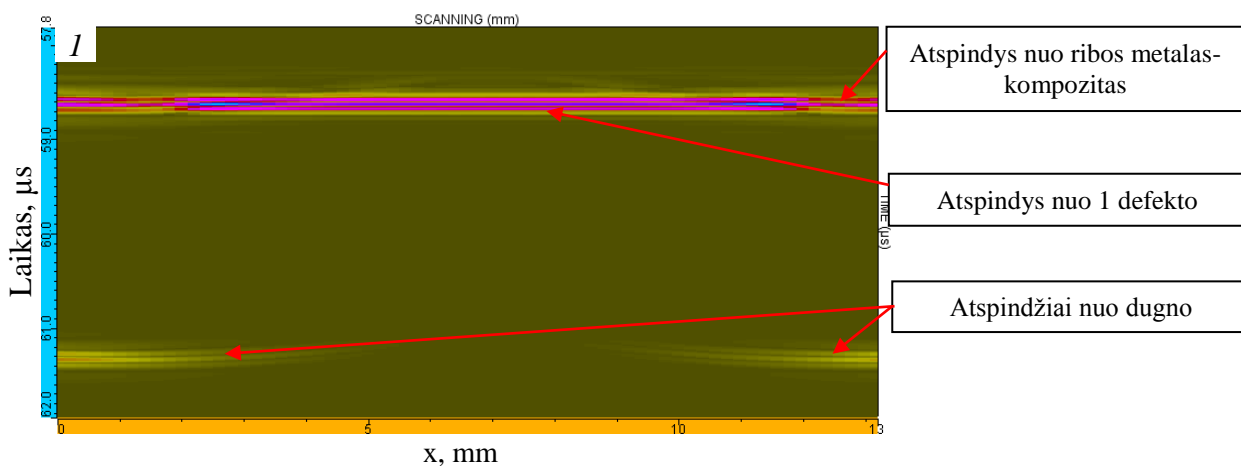
2.4.2 paveiksle nurodytose pozicijose naudojant 10 MHz keitiklį buvo užfiksuoti atspindžiai iš metalo pusės nuo visų defektų (2.4.3 pav.). Kaip matome iš paveikslo 1 ir 2 pozicijose matomi atspindžiai ir aiškiai galima atskirti delaminacijas. Pozicijose 3 ir 4 taip pat pastebimi gana akivaizdūs atspindžiai nuo defektų. Pozicijoje 4 pastebima atspindys nuo defekto ir nuo arkos formos spyglio paviršiaus, tačiau šis rezultatas netenkina, kadangi spygliuotoje zonoje yra sudėtinga iš atvaizdo atskirti 3 defektą.

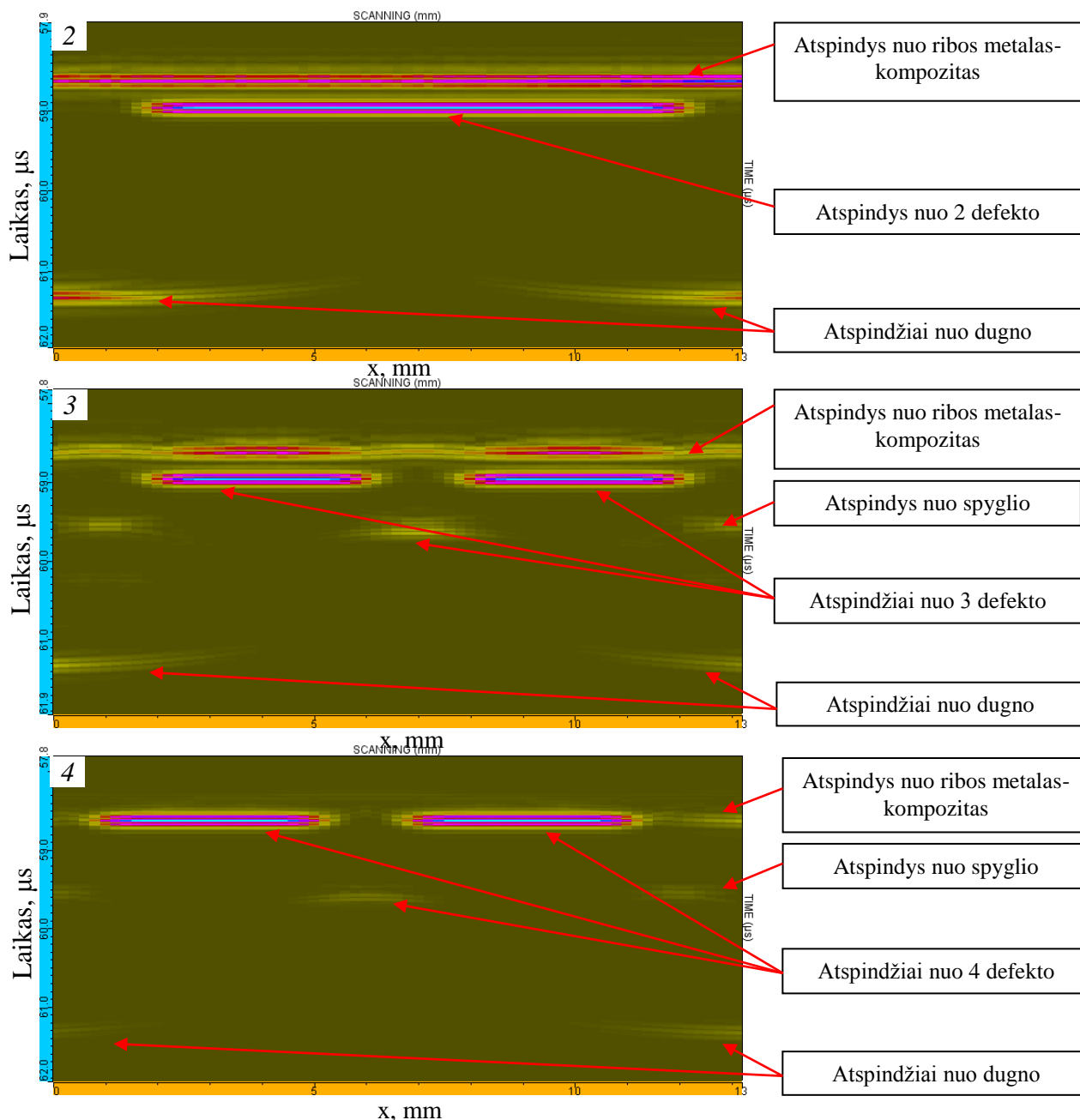




2.4.3 pav. Modeliavimo iš metalo pusės rezultatai panaudojant 10 MHz keitiklį.

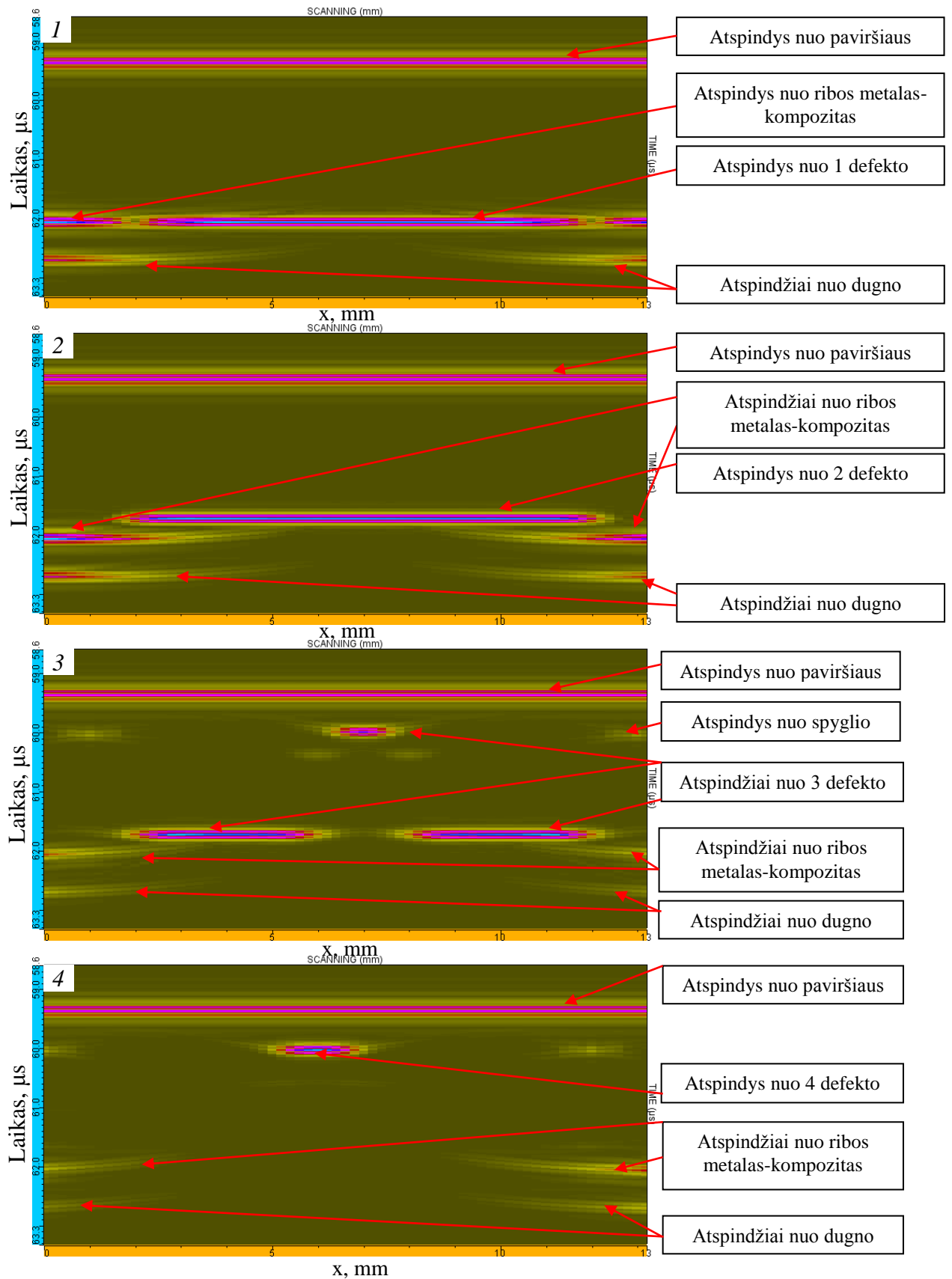
2.4.4 paveiksle parodyti skenavimo iš metalo pusės atspindžių atvaizdai nevertinant modelyje atspindžio nuo paviršiaus. Kaip matoma atspindžiai nuo dominančių vietų (kompozito – metalo riba, defektas, dugnas) yra ryškesni, kadangi viskas normuojama pirmo atspindžio atžvilgiu. Tokiu būdu galima tiksliau nustatyti defekto dydį, nes matomos ryškesnės jo ribos. Kaip pavyzdį galima pateikti 2.4.3 paveikslo 3 defekto atvaizdą ir 2.4.4 paveikslo 3 defekto atspindį. Pirmu atveju atspindžiai yra neryškūs ir juos galima sumaišyti su atspindžiu nuo sveiko spyglio. Antruoju atveju delaminaciją įmanoma atskirti nuo sveikos vietos.



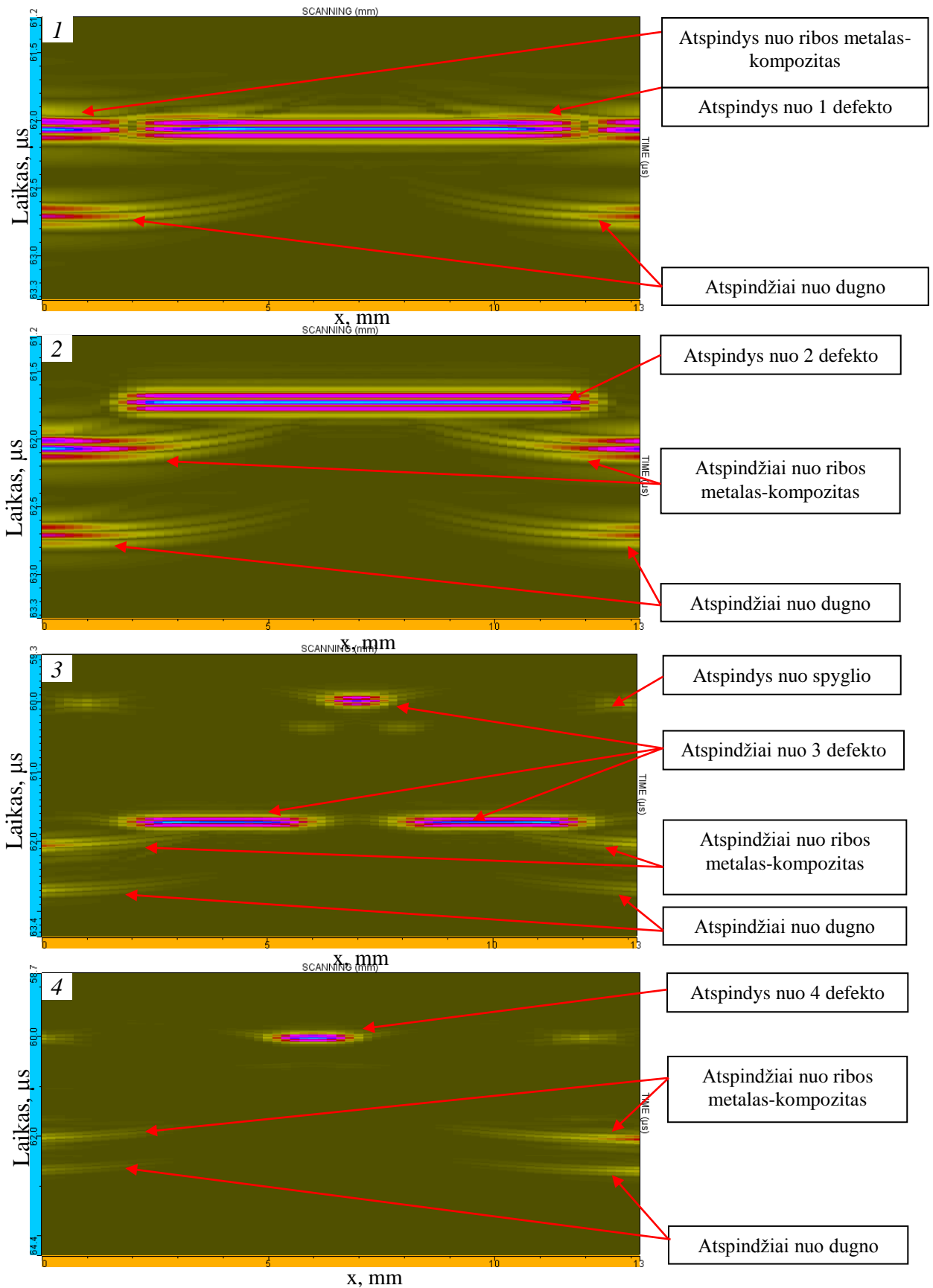


2.4.4 pav. Modeliavimo iš metalo pusės rezultatai panaudojant 10 MHz keitiklį atmetant paviršinio atspindžio įtaką.

2.4.5 paveiksle modeliuota tais pačiais parametrais ir tvarka, tačiau tirta iš kompozito pusės. Kaip matoma defektai matosi ryškiau negu lyginant su tyrimu iš metalo pusės (2.4.3 pav.), kadangi ultragarso banga nepraranda tiek energijos kiek sklisdama metalu ir pereidama į kompozitinę dalį. Visi 4 defektai atspindi aukštos amplitudės signalą. Taip pat net ir įvertinus atspindį nuo paviršiaus galima išskirti defektus (2.4.5 pav. 3, 2.4.6 pav. 3).

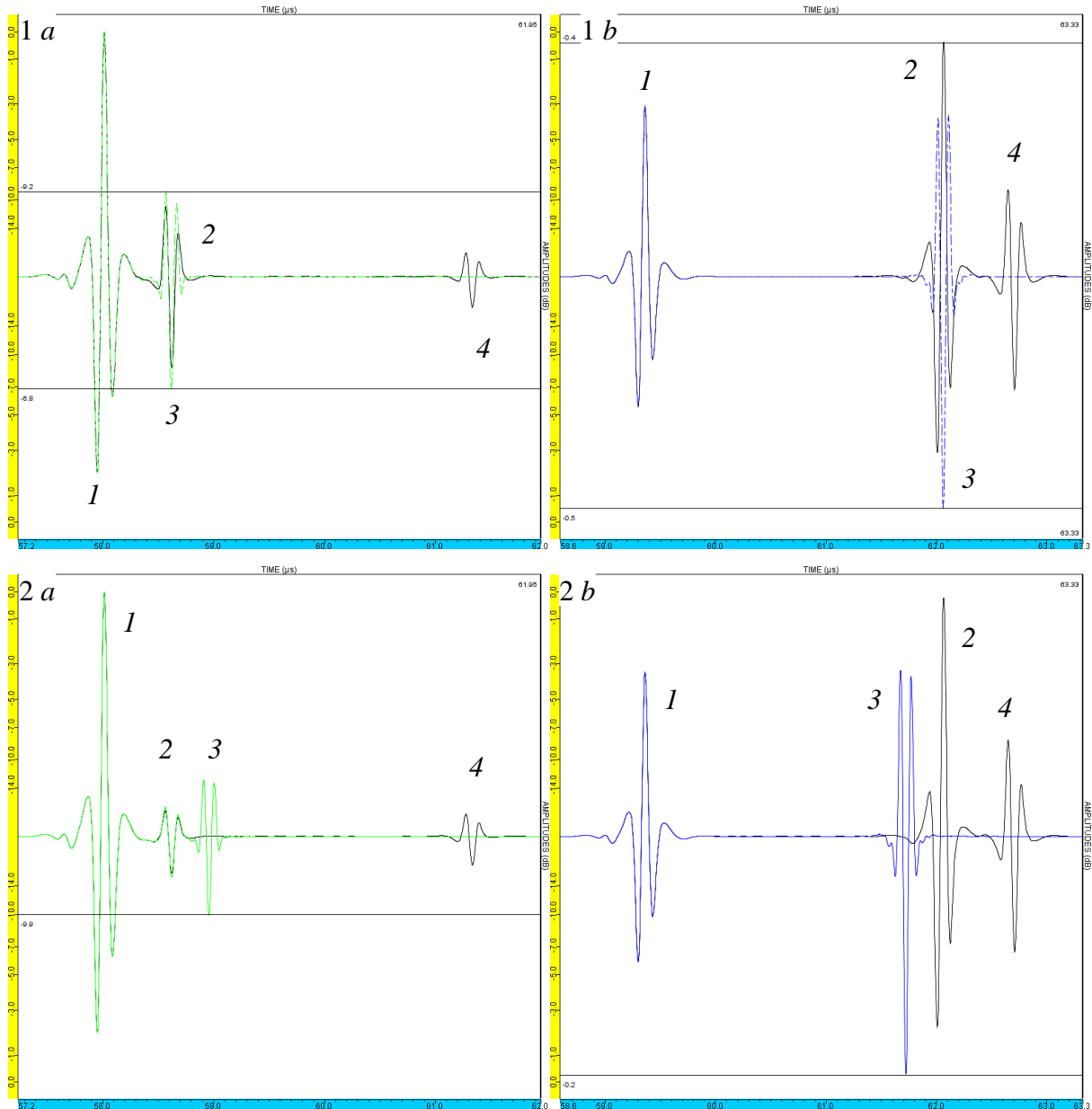


2.4.5 pav. Modeliavimo iš kompozito pusės rezultatai panaudojant 10 MHz keitiklį.



2.4.6 pav. Modeliavimo iš kompozito pusės rezultatai panaudojant 10 MHz keitiklį atmetant paviršinio atspindžio įtaką.

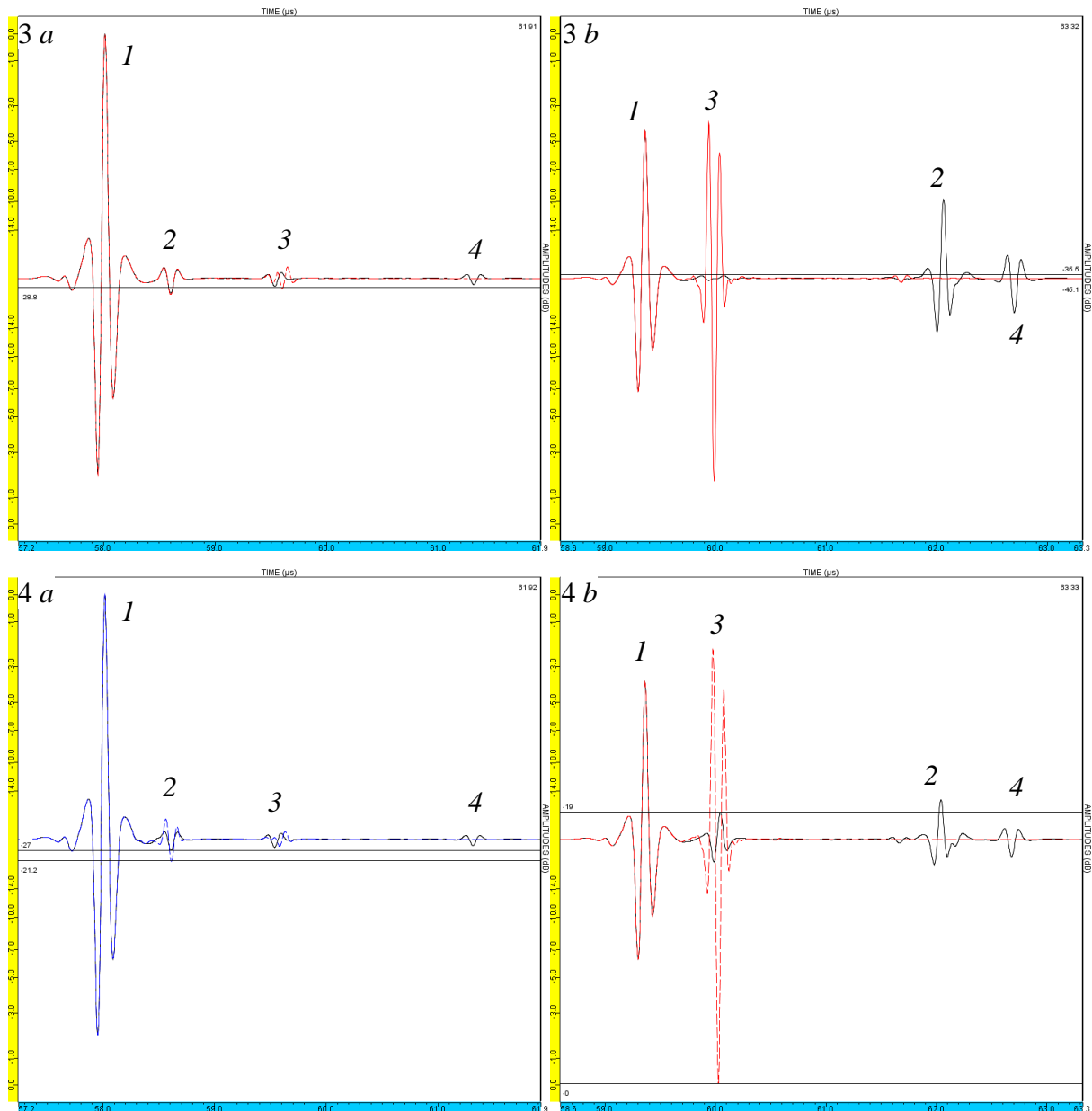
2.4.7 paveiksle 1 ir 2 defektų A tipo atvaizdai gauti naudojant 10 MHz keitiklį. *A* pusėje (kairė) parodyta rezultatai kai keitiklis pozicionuojamas iš metalo pusės, o *b* pusėje (dešinė) kai keitiklis pozicionuojamas iš kompozito pusės. Paveiksle spalvotas signalas atspindi vietą ties defektu, o juodas ties gera vieta. Kaip matoma 1 bei 2 defektų atspindžių amplitudės yra $-6,8$ dB ir $-8,8$ dB. Tuo tarpu tiriant iš kompozito pusės tų pačių defektų amplitudės $-0,5$ dB bei $-0,2$ dB.



2.4.7 pav. 1 ir 2 defektų A tipo atvaizdai gauti naudojant 10 MHz keitiklį (1 *a*, 2 *a* – pozicionavimas iš metalo pusės; 1 *b*, 2 *b* – pozicionavimas iš kompozito pusės) (Kursyvu sunumeruoti atspindžiai 1 – atspindys nuo paviršiaus; 2 – atspindys nuo metalo – kompozito ribos; 3 – atspindys nuo defekto; 4 – atspindys nuo dugno). Spalvotas signalas ties defektu, o juodas ties gera vieta.

2.4.8 paveiksle 3 ir 4 defektų A tipo atvaizdai gauti naudojant 10 MHz keitiklį. Kaip ir 2.4.7 paveiksle *a* pusėje (kairė) parodyta rezultatai kai keitiklis pozicionuojamas iš metalo pusės, o *b* pusėje

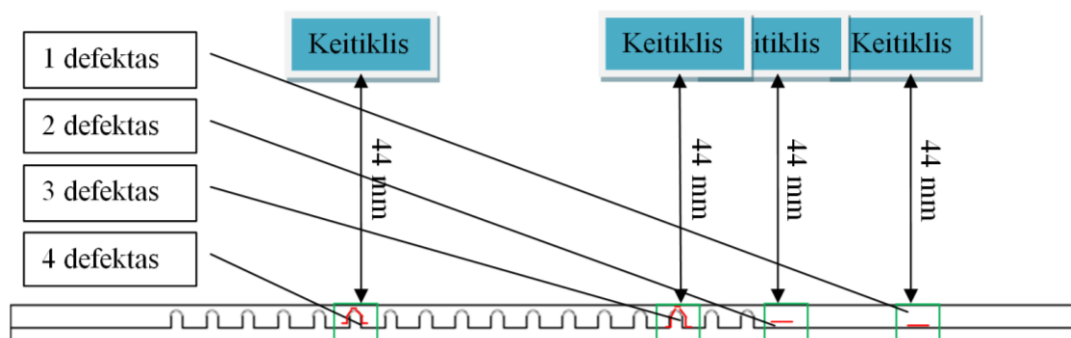
(dešinė) kai keitiklis pozicionuojamas iš kompozito pusės, tačiau defektų pozicijos yra ties spygliuota zona. Kaip matoma 3 bei 4 defektų metalo (*a*) pusėje yra silpni lyginant su atspindžiu nuo paviršiaus. Šiuose atvaizduose dar galima išskirti defektines vietas, bet lyginant su kompozito (*b*) puse matomas žymus amplitudžių skirtumas. *A* pusėje signalo atspindėto nuo 3 defekto amplitudė yra $-28,8$ dB, o nuo 4 defekto amplitudė atitinkamai $-21,2$ dB. Tuo tarpu iš kompozito pusės (2.4.8 pav. *b* pusė) signalų atspindėtų nuo defektų amplitudės atitinkamai yra $-1,1$ dB (atspindys nuo spyglio viršūnės) bei $-0,1$ dB.



2.4.8 pav. 3 ir 4 defektų A tipo atvaizdai gauti naudojant 10 MHz keitiklį (3 *a*, 4 *a* – pozicionavimas iš metalo pusės; 3 *b*, 4 *b* – pozicionavimas iš kompozito pusės) (Kursyvu sunumeruoti atspindžiai 1 – atspindys nuo paviršiaus; 2 – atspindys nuo metalo – kompozito ribos; 3 – atspindys nuo defekto; 4 – atspindys nuo dugno). Spalvotas signalas ties defektu, o juodas ties gera vieta.

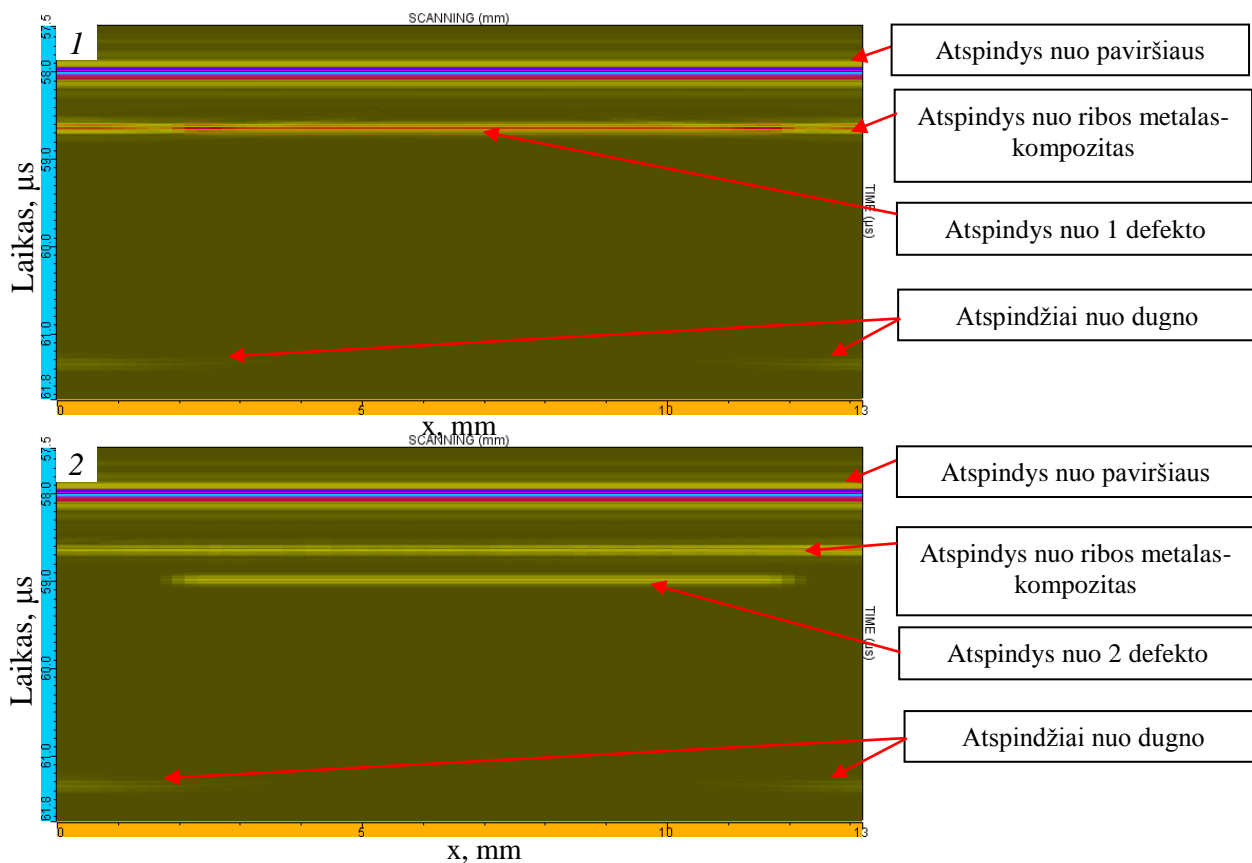
2.5. Optimalių parametrų nustatymas eksperimentiniam matavimui panaudojant 15 MHz keitiklį

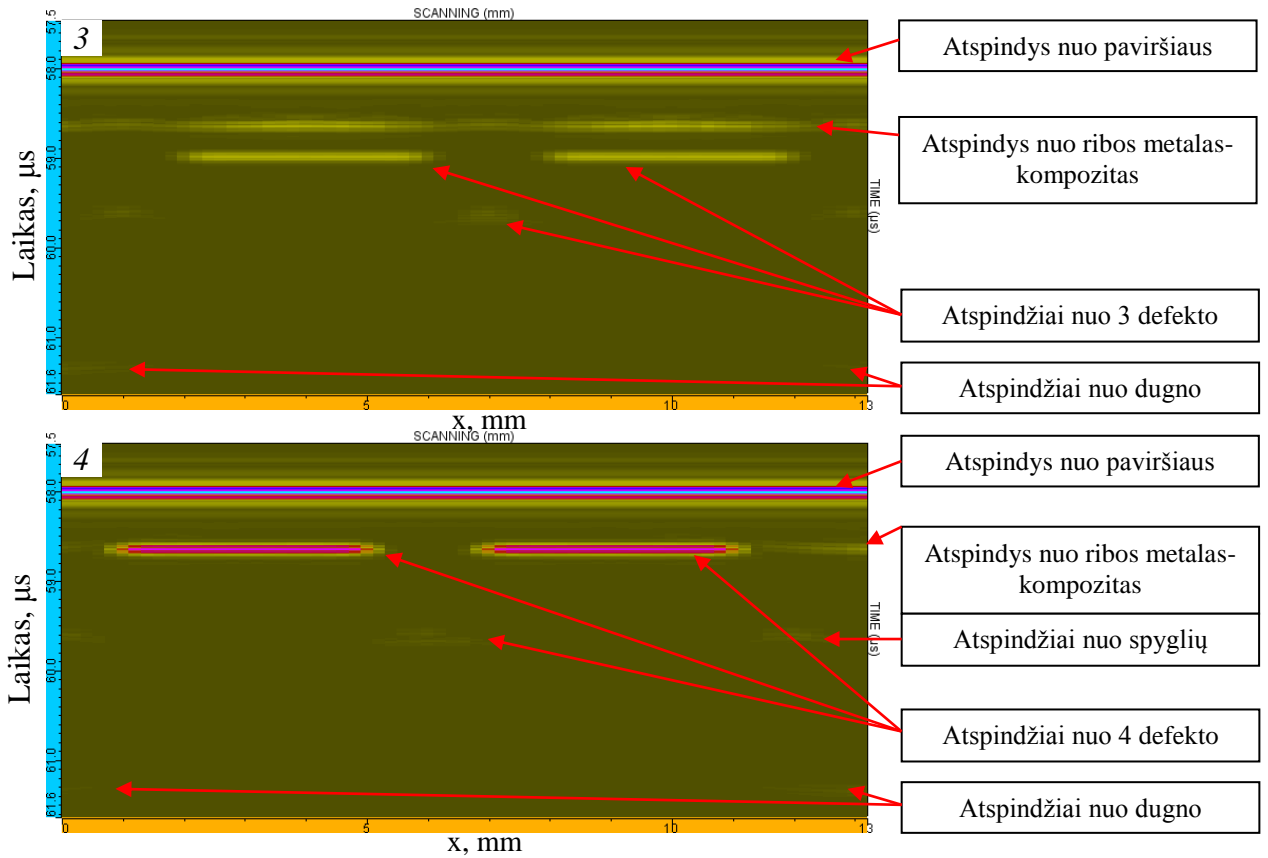
Modeliavimas buvo vykdomas pagal 2.5.1 paveiklo schemą imant kiekvieną defektą atskirai 6x13 mm zonos plote ir judant keitikliui iš dešinės į kairę. Skenavimo parametrai buvo išlaikyti tie patys norint nustatyti skirtumą tarp rezultatų su 10 MHz ir 15 MHz keitikliais. Kaip ir skenuojant 10 MHz keitikliu taip ir su 15 MHz pirmiausiai skenuota keitikliu iš metalo pusės, po to iš kompozito.



2.5.1 pav. Skenavimo 15 MHz keitikliu schema.

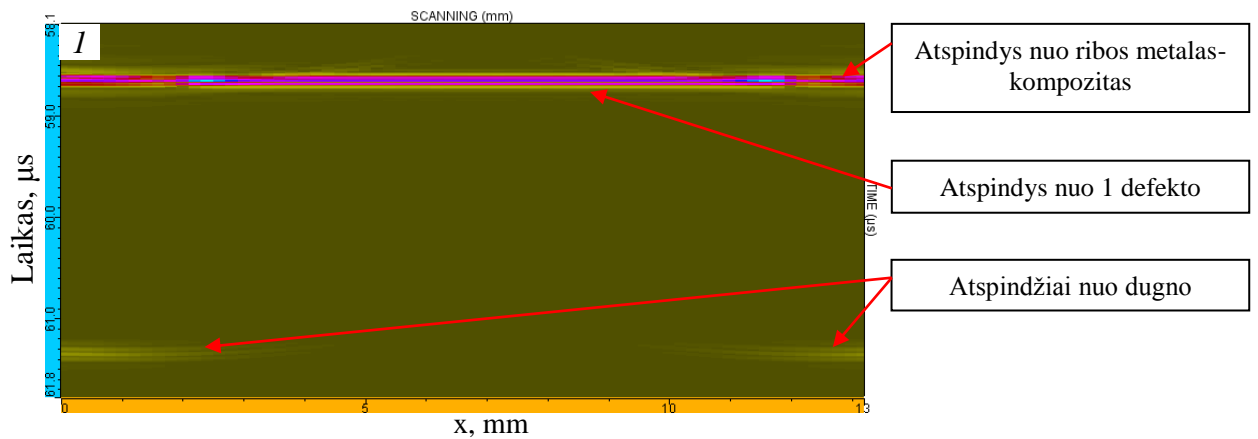
Iš modeliavimo rezultatų (2.5.2 pav.) matoma, kad naudojant 15 MHz keitiklį taip pat galima gana aiškiai identifikuoti atspindžius nuo defektų, tačiau šie atspindžiai yra kur kas mažiau išskiriami negu naudojant 10 MHz keitiklį. Tai aiškiai matoma lyginant 2.4.3 ir 2.5.2 paveikslų rezultatus 3 bei 4 pozicijose. Matoma, kad atspindžiai su 15 MHz keitikliu yra daug šviesesni negu naudojant 10 MHz.

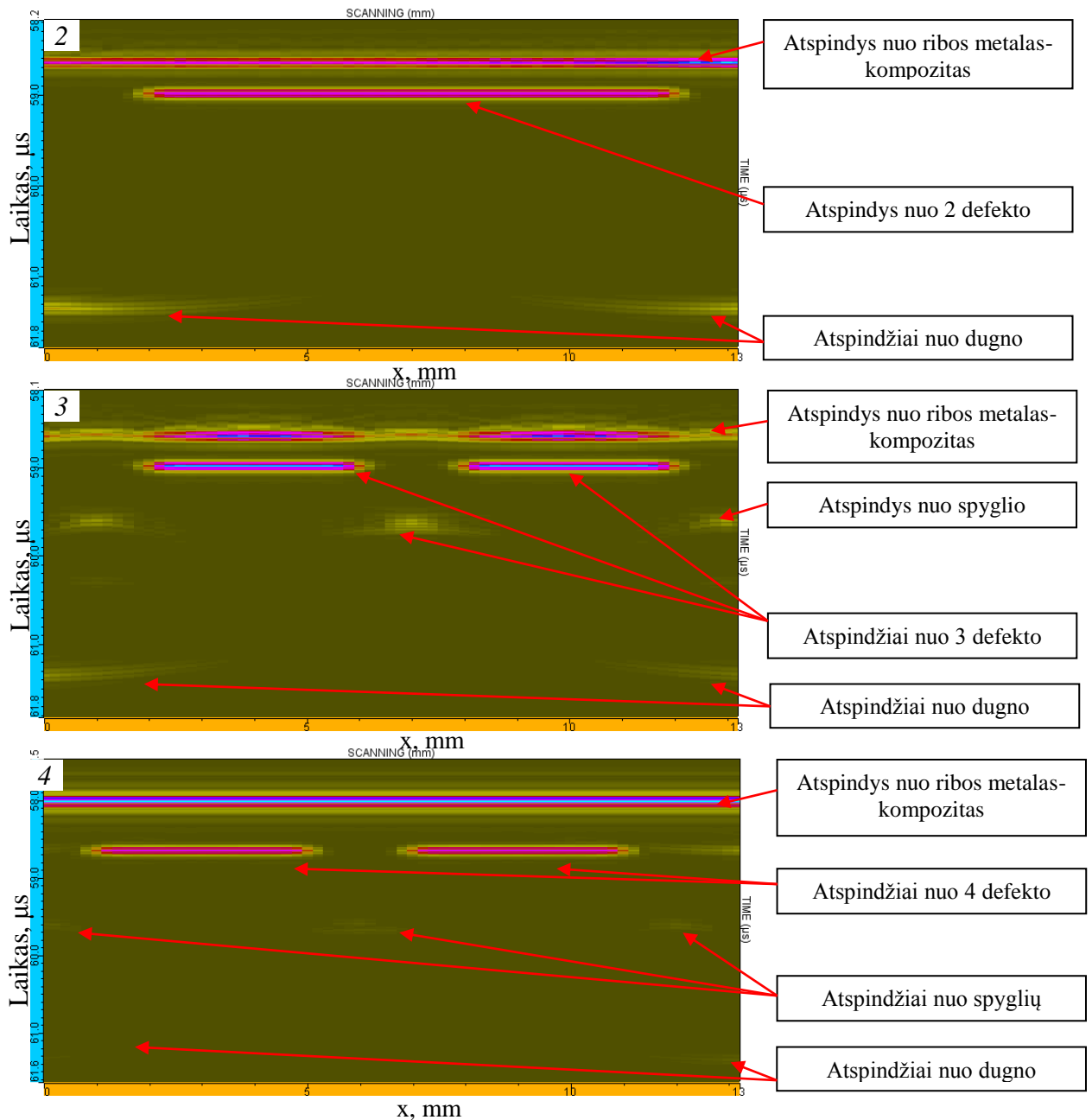




2.5.2 pav. Modeliavimo rezultatai panaudojant 15 MHz keitiklį skenuojant iš metalo pusės.

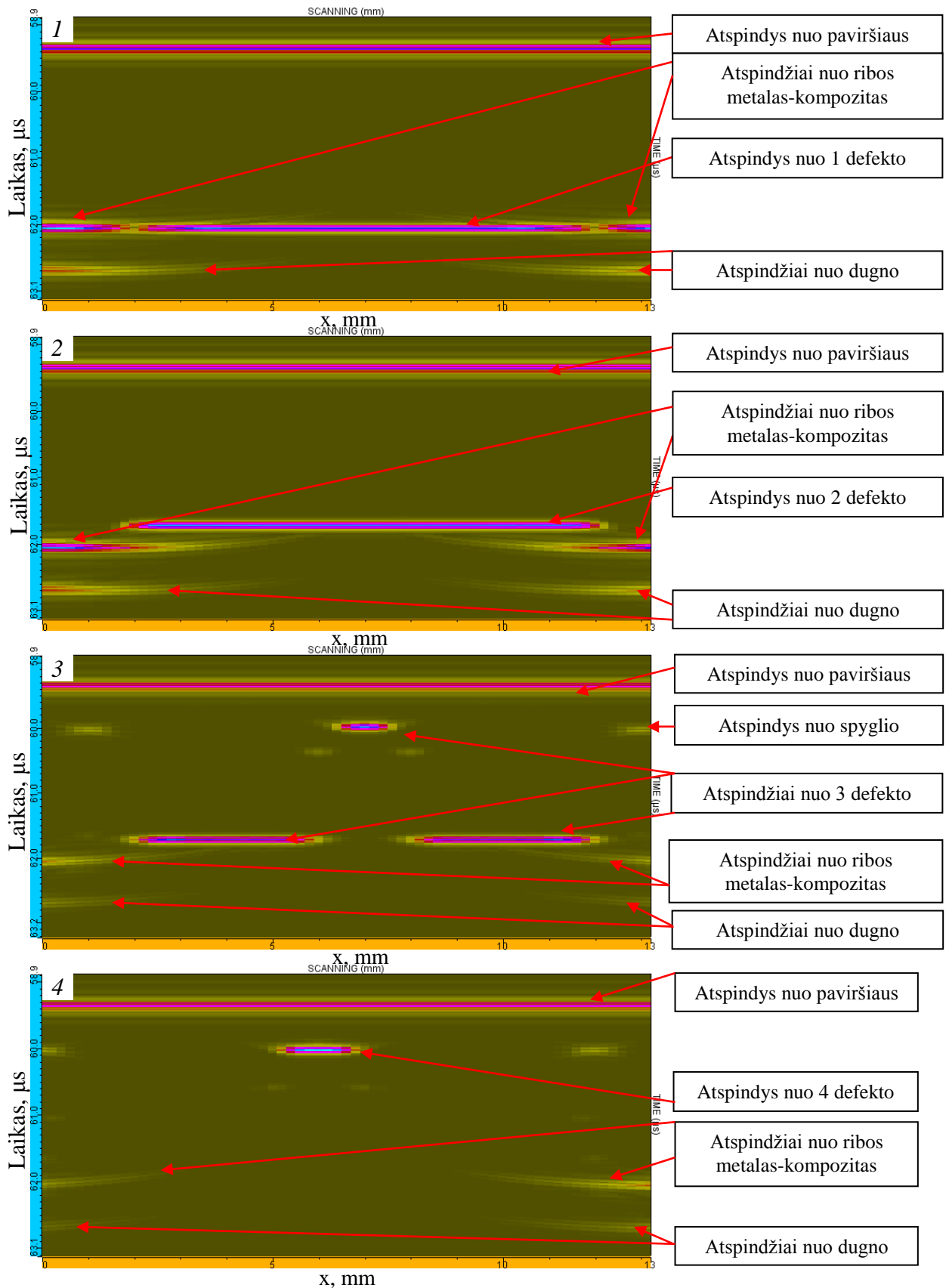
Silpnesni atspindžiai modeliuojant iš metalo pusės su 15 MHz keitikliu yra pasekmė to, kad aukštesnio dažnio keitikliai turi mažesnę skvarbą. Kaip matome 2.5.3 paveikslo 1 dalyje dugno atspindys yra labai nežymus iš to galima spręsti, kad šio atspindžio amplitudė bus maža..



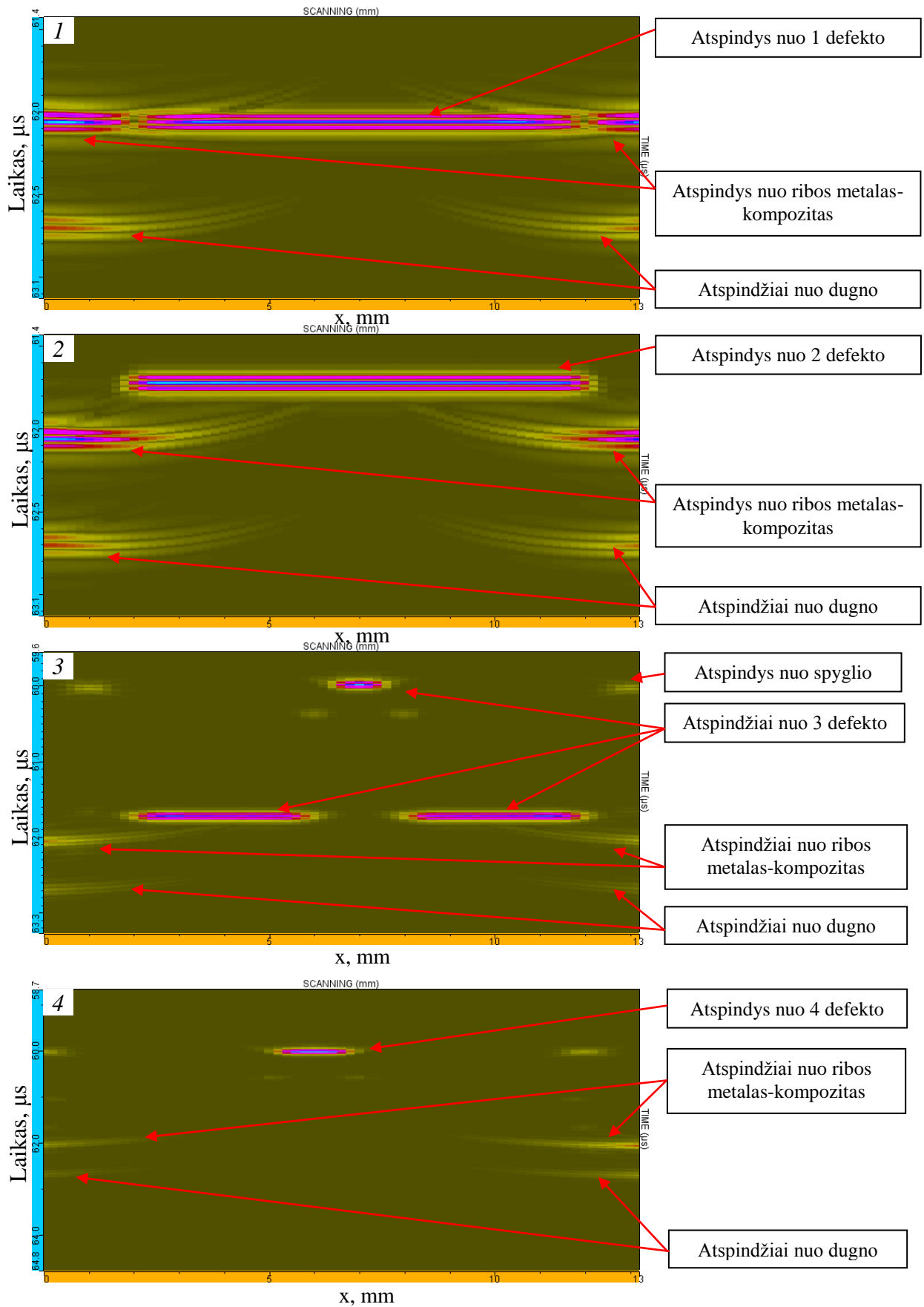


2.5.3 pav. Modeliavimo rezultatai panaudojant 15 MHz keitiklį skenuojant iš metalo pusės atmetant paviršinio atspindžio įtaką.

Nuskenavus modelį iš kompozito pusės (2.5.4 pav.) gauti atspindžiai yra daug ryškesni negu skenuojant iš metalo pusės (2.5.2 pav.). Modeliuojant iš kompozito pusės bei atmetant paviršiaus atspindžio įtaką defektų atspindžiai dar labiau išryškėja, o kartu padidėja jų skiriamoji geba (2.5.5 pav.). Aukštesnė geba leidžia aptikti defektus dar jų pradinėje vystymosi stadijoje kai jie yra dar labai nedideli.

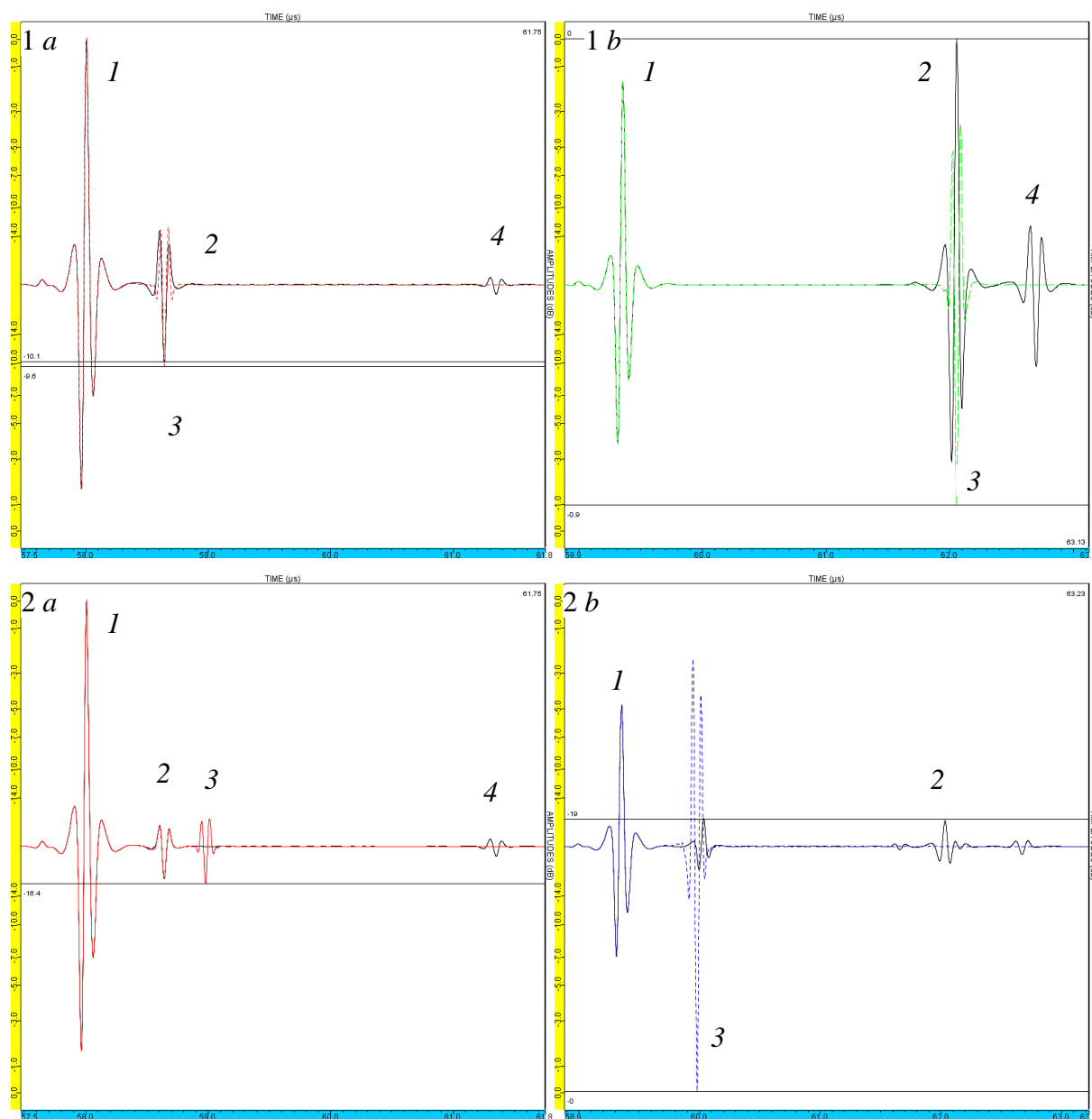


2.5.4 pav. Modeliavimo rezultatai panaudojant 15 MHz keitiklį skenuojant iš kompozito pusės.



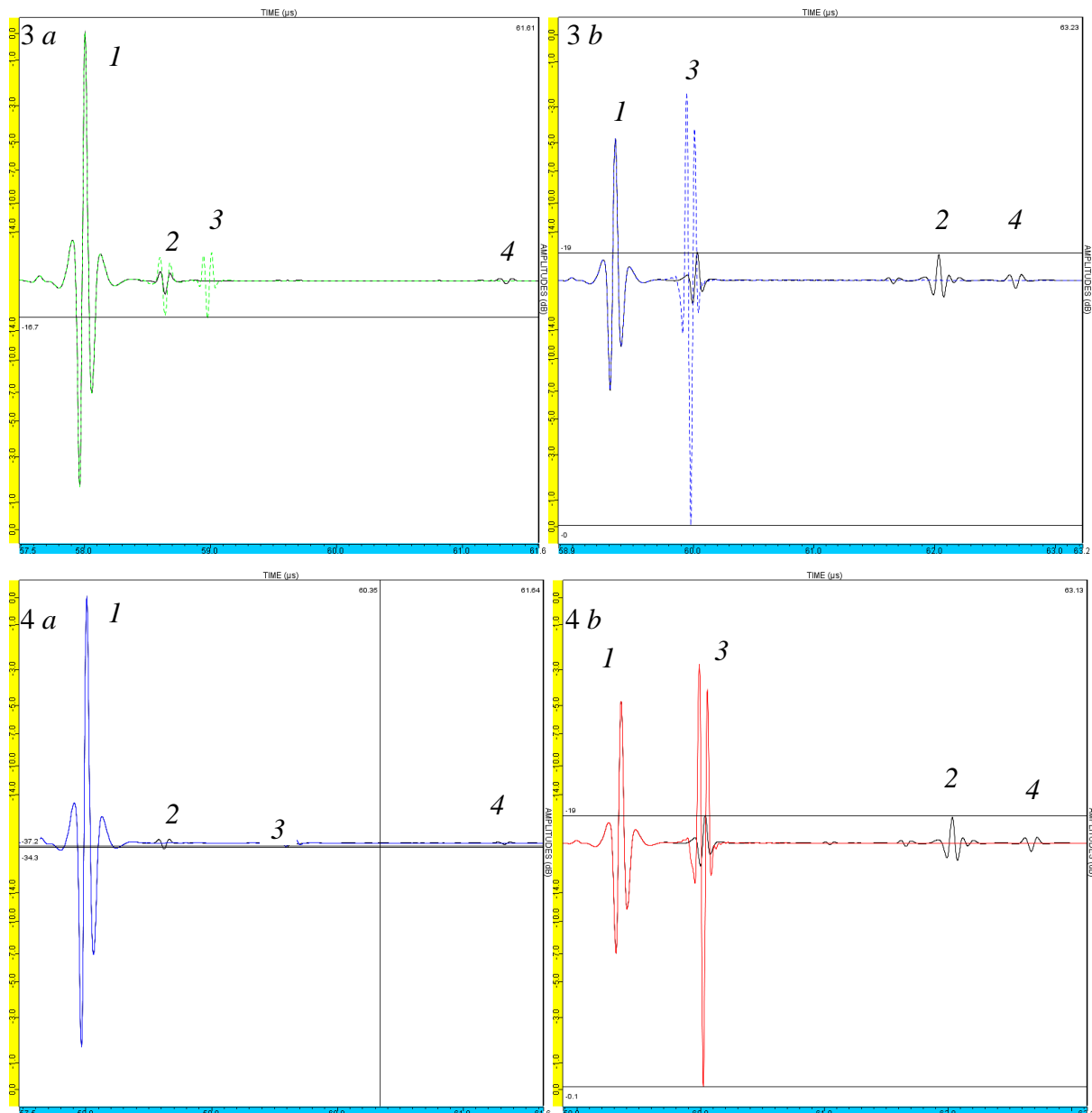
2.5.5 pav. Modeliavimo rezultatai panaudojant 15 MHz keitiklį skenuojant iš kompozito pusės atmetant paviršinio atspindžio įtaką.

2.5.6 paveiksle 1 ir 2 defektų A tipo atvaizdai gauti naudojant 15 MHz keitiklį. *A* pusėje (kairė) parodyta rezultatai kai keitiklis pozicionuojamas iš metalo pusės, o *b* pusėje (dešinė) kai keitiklis pozicionuojamas iš kompozito pusės. Paveiksle spalvotas signalas atspindi vietą ties defektu, o juodas ties gera vieta. Kaip matoma atspindėtų signalų nuo 1 bei 2 defektų amplitudės *a* pusėje yra $-9,6$ dB ir $-16,4$ dB. Tuo tarpu tiriant iš kompozito pusės signalų atspindėtų nuo tų pačių defektų amplitudės yra $-0,9$ dB bei $-0,3$ dB.



2.5.6 pav. 1 ir 2 defektų A tipo atvaizdai gauti naudojant 15 MHz keitiklį (1 *a*, 2 *a* – pozicionavimas iš metalo pusės; 1 *b*, 2 *b* – pozicionavimas iš kompozito pusės) (Kursyvu sunumeruoti atspindžiai 1 – atspindys nuo paviršiaus; 2 – atspindys nuo metalo – kompozito ribos; 3 – atspindys nuo defekto; 4 – atspindys nuo dugno). Spalvotas signalas ties defektu, o juodas ties gera vieta.

2.5.7 paveiksle 3 ir 4 defektų A tipo atvaizdai gauti naudojant 15 MHz keitiklį. Kaip ir 2.5.6 paveiksle *a* pusėje (kairė) parodyta rezultatai kai keitiklis pozicionuojamas iš metalo pusės, o *b* pusėje (dešinė) kai keitiklis pozicionuojamas iš kompozito pusės, o defektų pozicijos yra ties spygliuota zona. Kaip matoma atspindėti signalai nuo 3 bei 4 defektų *a* pusėje yra silpni lyginant su paviršiaus atspindžiu. Šiuose atvaizduose dar galima išskirti defektines vietas, bet lyginant su *b* puse matomas žymus amplitudžių skirtumas. Tiriant iš metalo pusės atspindėto signalo nuo 3 defekto amplitudė yra $-16,7$ dB, o nuo 4 defekto atitinkamai $-34,3$ dB. Tuo tarpu iš kompozito pusės (2.5.7 pav. *b* pusė) signalų atspindėtų nuo defektų amplitudės atitinkamai yra $-0,1$ dB bei $-0,1$ dB.



2.5.7 pav. 3 ir 4 defektų A tipo atvaizdai gauti naudojant 15 MHz keitiklį (3 *a*, 4 *a* – pozicionavimas iš metalo pusės; 3 *b*, 4 *b* – pozicionavimas iš kompozito pusės) (Kursyvu sunumeruoti atspindžiai 1 – atspindys nuo paviršiaus; 2 – atspindys nuo metalo – kompozito ribos; 3 – atspindys nuo defekto; 4 – atspindys nuo dugno). Spalvotas signalas ties defektu, o juodas ties gera vieta.

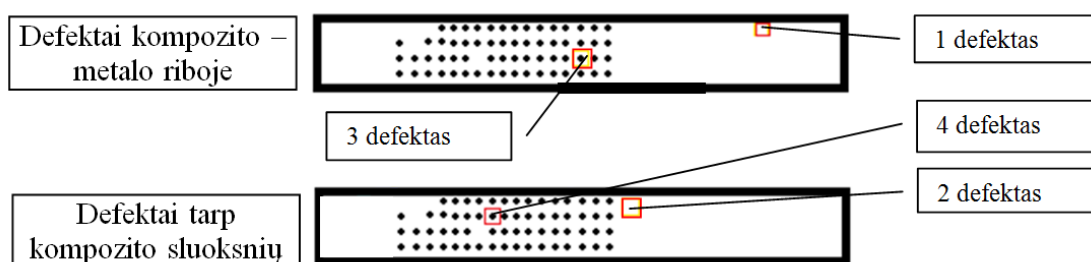
2.6. Apibendrinimas

Nagrinėjant A vaizdo modeliavimo rezultatus naudojant 10 MHz keitiklį matoma tendencija, kad skenavime iš metalo pusės ties spygliuota zona amplitudė yra maždaug 20 kartų mažesnė negu skenuojant iš kompozito pusės. Tuo tarpu tiriant 1 bei 2 defektus iš metalo pusės amplitudė yra apie 7,5 karto mažesnė negu iš kompozitinės medžiagos pusės.

Lyginant A vaizdo modeliavimo su 15 MHz keitikliu rezultatus pastebima ta pati tendencija kaip ir modeliuojant su 10 MHz keitikliu. Tiriant iš metalo pusės ties spygliuota zona amplitudė yra maždaug 16 – 20 kartų mažesnė negu skenuojant iš kompozito pusės. Tuo tarpu lyginant 1 bei 2 defektų iš metalo pusės amplitudes šios yra mažesnės apie 10– 15 kartų negu iš kompozitinės medžiagos pusės. Nustatyta, kad bandinį geriausiai būtų tirti iš kompozitinės dalies pusės dėl to, kad metalinė dalis dėl savo vidinės struktūros smarkiai slopina signalą ir atspindžiai nuo defektų duoda daug silpnesnį atspindį negu tiriant iš kompozitinės pusės. Panaudojant sukurtą modelį buvo įmanoma aptikti visus keturis defektus panaudojant abudu keitiklius, dėl to galima teigti, kad tai yra korektiškas ir taikytinas modelis.

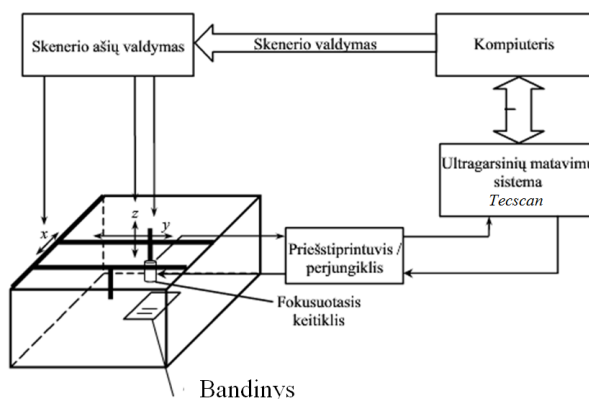
3. EKSPERIMENTINĖ DALIS

2 sykriuje sukurtas matavimo modelis teoriškai leidžia aptikti defektus. Tolimesnis darbo uždavinys yra pritaikant sukurtą modelį aptikti defektus bandinyje atliekant realius matavimus. Pagrindinė šios dalies problema yra ta, kad matavimo modelis remiasi idealiais dėsniais, o eksperimentinių matavimų metu matavimo kokybė priklauso nuo daugelio aplinkinių poveikių, kas apsunkina pačią matavimų eigą bei įtakoja galutinį rezultatą. 3.1 paveiksle pažymėtos ieškomų defektų pozicijos bandinyje. Atliekant realius matavimus bus tikimasi surasti visus 4 defektus esančius dviejuose skirtinguose gyliuose. Kaip matome du defektai yra ties spygliuota zona kiti du ties lygia (3.1 pav.). Defektas 1 ir defektas 2 yra ties kompozito – metalo riba, o defektai 3; 4 po dviejų anglies pluošto sluoksnių ($\approx 0,5$ mm).



3.1 pav. Defektų pozicijos bandinyje.

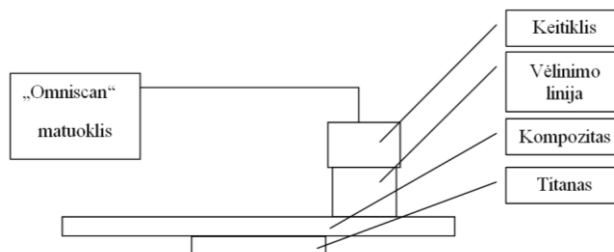
Matavimai ieškant defektų atlikti ultragarsinių matavimų sistema „TecScan“. Pagal išnagrinėtą teorinę medžiagą bei sudarytą modelį tyrimas atliktas imersiniu būdu patalpinant bandinį vandens talpoje, (3.2 pav.) skenuojant su 10 MHz bei 15 MHz fokusuotaisiais keitikliais x ir y ašimis.



3.2 pav. Matavimo struktūrinė schema [21].

3.1. Ultragarso bangų greičio matavimas

Norint nustatyti keitiklio pozicionavimo atstumą nuo bandinio eksperimentiškai išmatuotas išilginių ultragarso bangų greitis kompozitinėje dalyje. Įvertinus ploną bandinio sluoksnio storį (4 mm) naudota vėlinimo linija, siekiant išskirti atspindį nuo kompozito bei titano ribos. Žinant, kad defektų nėra titano dalyje ir skenavimas bus atliekamas iš anglies pluošto dalies, greitis matuotas tik kompozitinėje medžiagoje. Greičio matavimams panaudotas „Omniscan“ nešiojamas ultragarsinių matavimų aparatas su 5 MHz plokščiuoju statmenu išilginių bangų keitikliu panaudojant vėlinimo liniją (3.1.1 pav.).



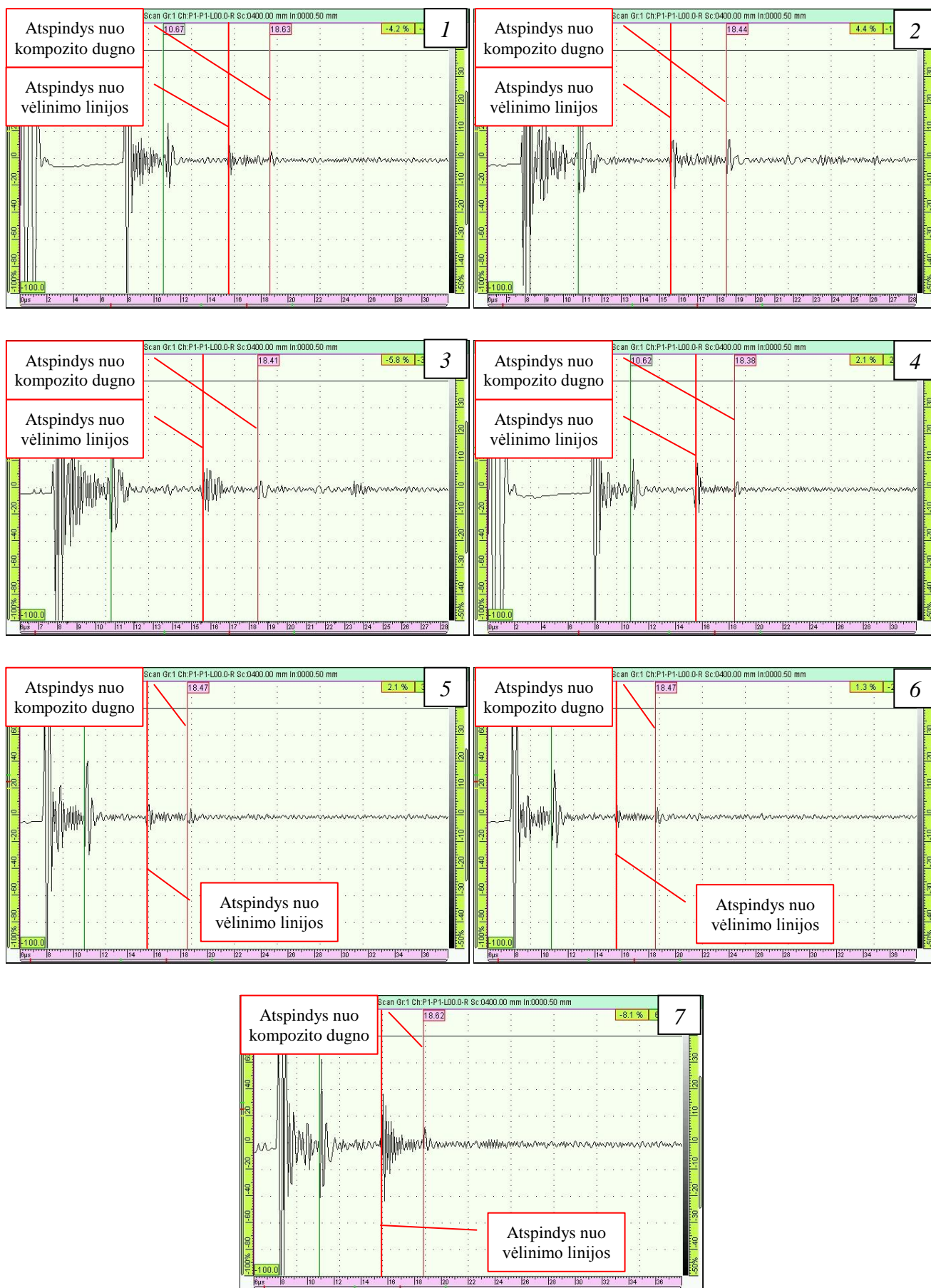
3.1.1 pav. Išilginių ultragarso bangų matavimo struktūrinė schema.

Matavimai atlikti po 10 kartų išmatuojant kompozitinės dalies storį ir 10 kartų išmatuojant laiką, kurį ultragarso banga sklinda kompozite (3.1.2 pav.). Po to gauti rezultatai suvesti į 3.1.1 formulę [21] norint apskaičiuoti greitį tiriamojoje medžiagoje:

$$V = \frac{2H}{t_1 - t_0}; \quad (3.1.1)$$

čia; H – tiriamojo objekto aukštis; t_1 – signalo sklidimo laikas iki tiriamojo objekto dugno ir atgal; t_0 – signalo sklidimo laikas vėlinimo linijoje;

DEFEKTŲ VIETOS NUSTATYMAS ULTRAGARSU KOMPOZITŲ IR METALŲ SUJUNGIMUOSE



3.1.2 pav. Ultragarso greičio matavimo užfiksuoti signalai.

Norint rasti geriausią įvertį apskaičiuoti rezultatų vidurkiai. Iš 3.1 lentelės, duomenų matome, kad vidutinis kompozito storis yra 4,11 mm, o laikas, kurį ultragarso banga sklinda medžiagoje – 3,41 μ s. Pasinaudojant 3.1.1 formule apskaičiuotas greitis lygus 2405 m/s. Lyginant modelyje nurodytą greitį su išmatuotuoju gaunamas 5 m/s skirtumas (modelyje anglies pluošte ultragarso greitis lygus 2400m/s). Vertinant tai galima daryti išvadą, kad modeliuojant eksperimentą anglies pluoštas buvo aprašytas teisingai ir sumodeliuoti rezultatai yra tinkami pritaikyti eksperimentiniuose matavimuose.

3.1 Lentelė. Apskaičiuotų greičių reikšmės.

Rezultato Nr.	Kompozito storis, mm	Ultragarso bangos sklidimo laikas iki dugno, μs
1.	4,15	3,35
2.	4,1	3,47
3.	4,11	3,39
4.	4,08	3,37
5.	4,11	3,36
6.	4,13	3,4
7.	4,06	3,4
8.	4,14	3,42
9.	4,11	3,38
10.	4,07	3,5
Vidurkis:	4,11	3,41
Ultragarso greitis kompozite, mm/μs	2,405	

Keitiklio atstumas nuo bandinio apskaičiuotas iš matavimo duomenų remiantis 2.3 poskyryje nurodyta formule (2.3). Norint fokusuoti į kompozito ir metalo ribą, įsistačius reikšmes į formulę keitiklio pozicionavimo atstumas nuo bandinio apskaičiuotas 43,69 mm.

$$l_V = 50,8 - 4 \left(\frac{2628}{1480} \right) = 43,69 \text{ mm}$$

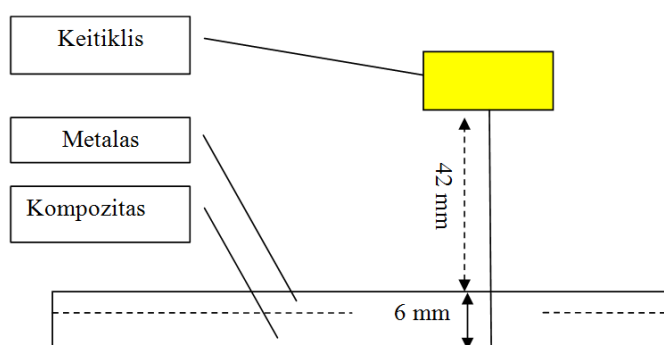
3.2. Eksperimentiniai matavimai ieškant defektų

Tyrimas su 10 MHz keitikliu iš titano pusės

Naudojant 10 MHz fokusuotąjį keitiklį tiriama buvo iš titano dalies. Skenuota x ir y ašimis 0,2 mm žingsniu. keitiklis pozicionuotas 42 mm atstumu nuo bandinio paviršiaus (3.2.1 pav.; 3.2.1 Lentelė).

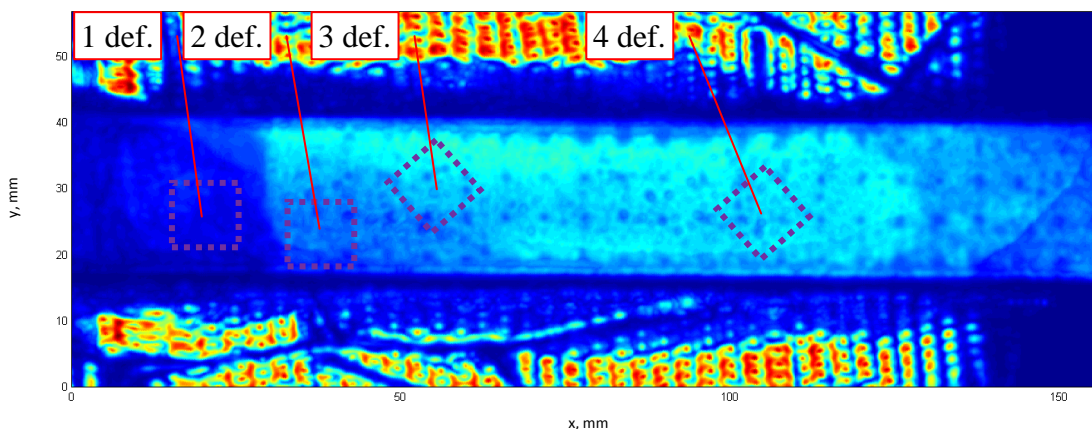
3.2.1 Lentelė. Eksperimento parametrai.

Parametras	Reikšmė
Keitiklio Dažnis	10 MHz
Keitiklio atstumas nuo bandinio	42 mm
Skenavimo ašys	x ; y
Skenavimo zona	157 mm x 57 mm
Skenavimo žingsnis	0,2 mm



3.2.1 pav. Bandinio ir keitiklio pozicionavimo schema.

Atlikus eksperimentą nuskenuojant bandinį iš metalo pusės C atvaizde matyti, kad defektų neįmanoma aptikti. Šis bandymas patvirtino hipotezę, kad matavimai iš titano pusės neduos teigiamų rezultatų. To priežastis yra tai, kad šis bandinyje naudojamas metalas yra labai grūdėtas ir dėl savo struktūros labai sklaido ultragarso bangas, ko pasekoje ultragarso banga neturi energijos atsispindėti nuo defektų.



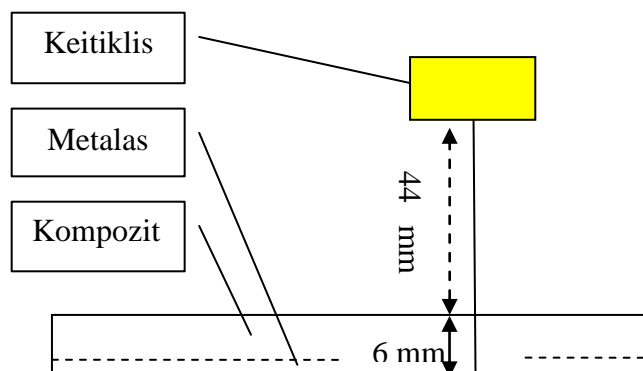
3.2.2 pav. Bandinio C atvaizdas skenuojant iš metalo pusės.

Tyrimas su 10 MHz keitikliu iš kompozito pusės

Įsitikinus, kad iš metalo pusės neįmanoma aptikti defektų naudojant 10 MHz fokusuotąjį keitiklį matavimai buvo atlikti iš kompozitinės dalies. Skenuota x ir y ašimis 0,2 mm žingsniu. Keitiklis pozicinuotas 44 mm atstumu nuo bandinio paviršiaus, norint fokusuoti į bandinio kompozito – metalo ribą (3.2.3 pav.; 3.2.2 Lentelė).

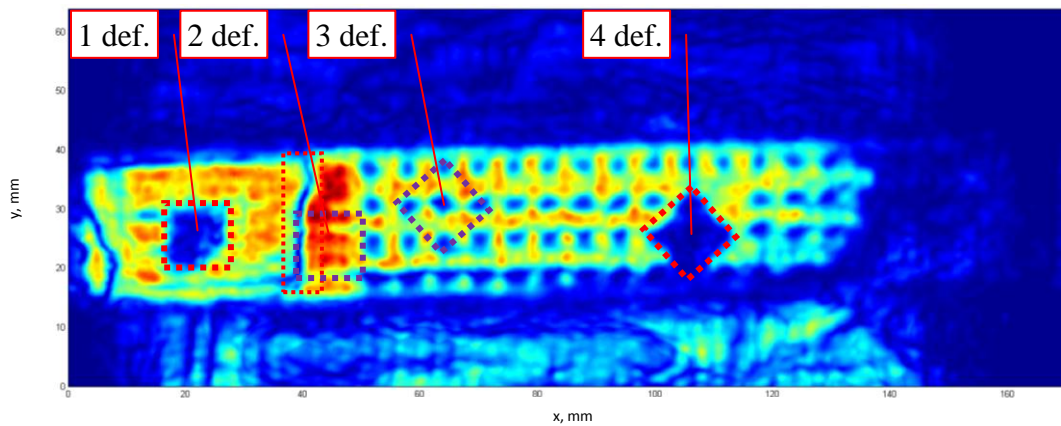
3.2.2 Lentelė. Eksperimento parametrai.

Parametras	Reikšmė
Keitiklio Dažnis	10 MHz
Keitiklio atstumas nuo bandinio	44 mm
Skenavimo ašys	x ; y
Skenavimo zona	170 mm x 64 mm
Skenavimo žingsnis	0,2 mm



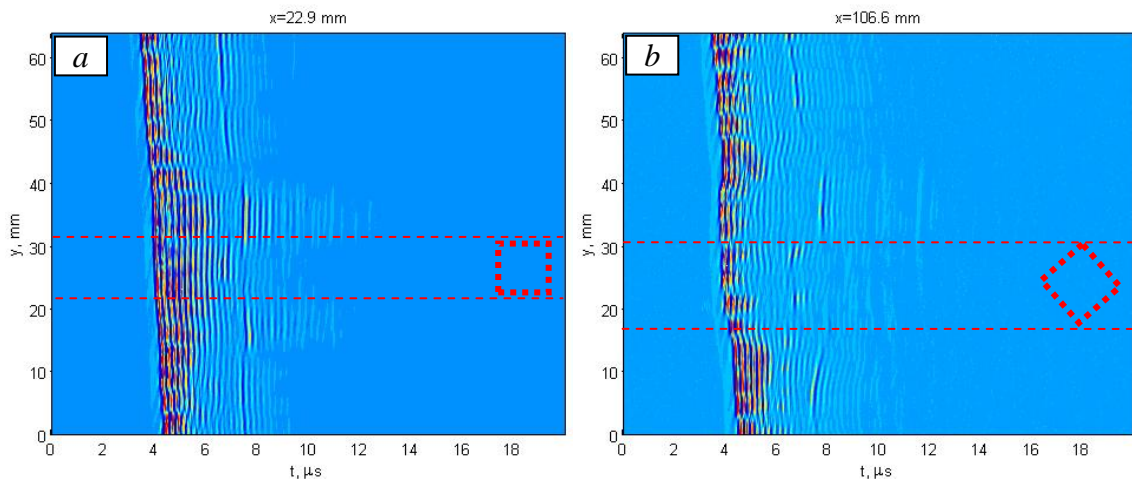
3.2.3 pav. Bandinio ir keitiklio pozicionavimo schema.

3.2.4 paveiksle pavaizduota bandinio C atvaizdai skenuojant iš kompozito pusės. Kaip matoma paveiksle galima išskirti 1 (tarp metalo ir kompozito) bei 4 (kompozite spygliuotoje zonoje) defektus (3.2.4 pav.). Taip pat ties 2 defekto vieta matomas stiprus atspindys, kuris uždengia defektą ir neleidžia jo matyti. Šalia, ties 38 mm riba x ašimi matosi dėl gamybos proceso atsiradęs trūkis. 2 bei 3 defektai šio eksperimento metu nebuvo aptikti (tamsesniais rėmeliais pažymėta, kur turėtų būti neaptikti defektai).



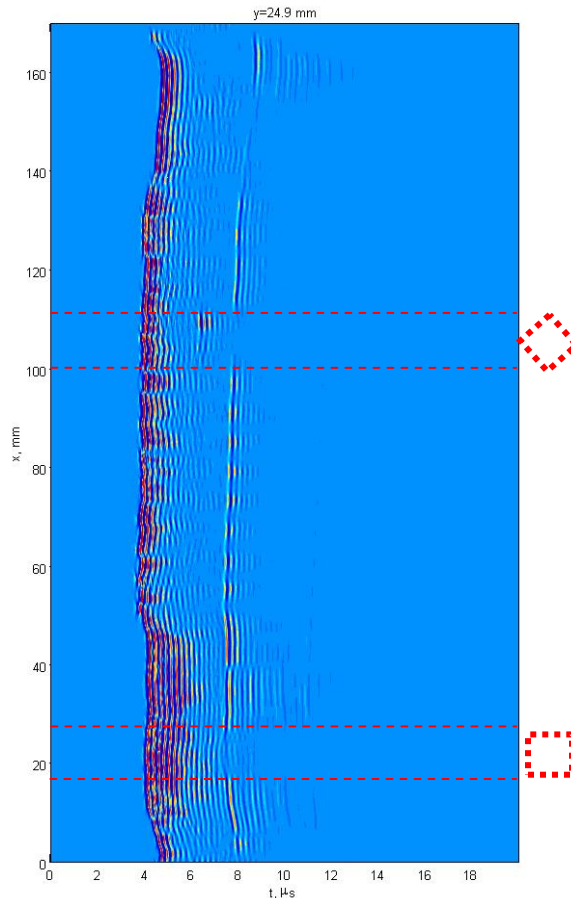
3.2.4 pav. Bandinio C atvaizdas skenuojant iš kompozito pusės su 10 MHz keitikliu.

3.2.5 paveiksle parodyti B atvaizdai skenuojant skersai bandinio atitinkamai 22,9 mm ir 106,6 mm y ašimis ties 1 defektu (21 mm – 31 mm ribose) ir ties 4 defektu (18 mm – 30 mm ribose). Kaip matoma 1 bei 4 defektai randami.



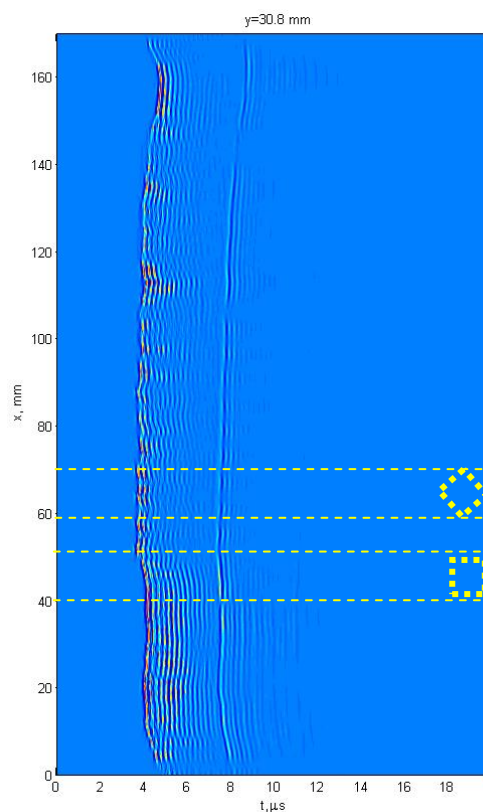
3.2.5 pav. Bandinio B atvaizdas skenuojant iš kompozito pusės skersai bandinio ties 1 defektu (a) ir ties 4 defektu (b) su 10 MHz keitikliu.

3.2.6 paveiksle pavaizduotas B atvaizdas skenuojant išilgai bandinio ties 24,9 mm y ašimi. Šiame paveiksle galima išskirti C atvaizde (3.2.4pav.) esančius defektus. Ties 18 – 28 mm matomas 1 defektas, ties 40 mm riba matomas trūkis, ties 100 – 110 mm 4 defektas.

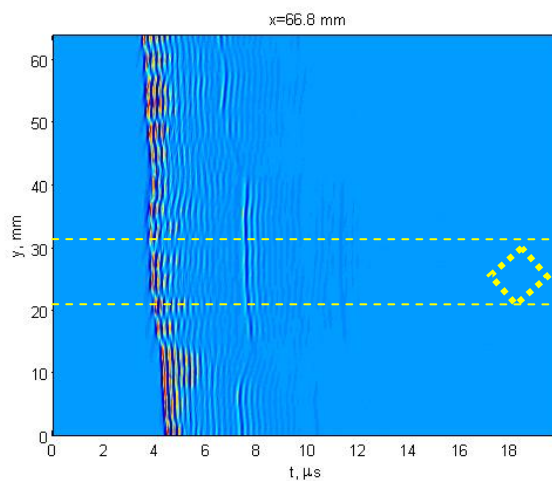


3.2.6 pav. Bandinio B atvaizdas skenuojant iš kompozito pusės išilgai bandinio su 10 MHz keitikliu.

3.2.7 paveiksle pavaizduota B atvaizdas skenuojant išilgai bandinio ties 30,8 mm y ašimi tikintis tiksliau nustatyti 3.2.4 paveiksle nerastus defektus (3.2.7 paveiksle pažymėta geltonai, tikėtinos defektų vietos). Kaip matoma šiame paveiksle defektų neįmanoma išskirti. Taip pat 3.2.8 paveiksle matoma, kad skersiniame bandinio B vaizde ties 66,8 mm riba defekto neįmanoma išskirti.

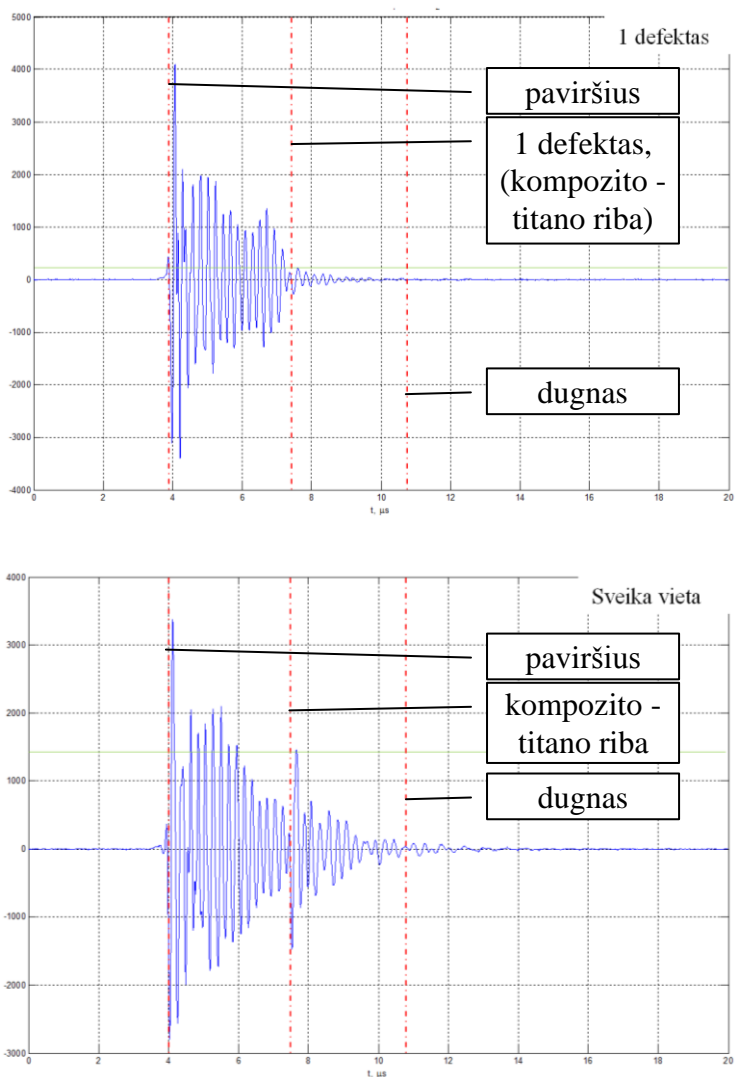


3.2.7 pav. Bandinio B atvaizdas skenuojant iš kompozito pusės išilgai bandinio.



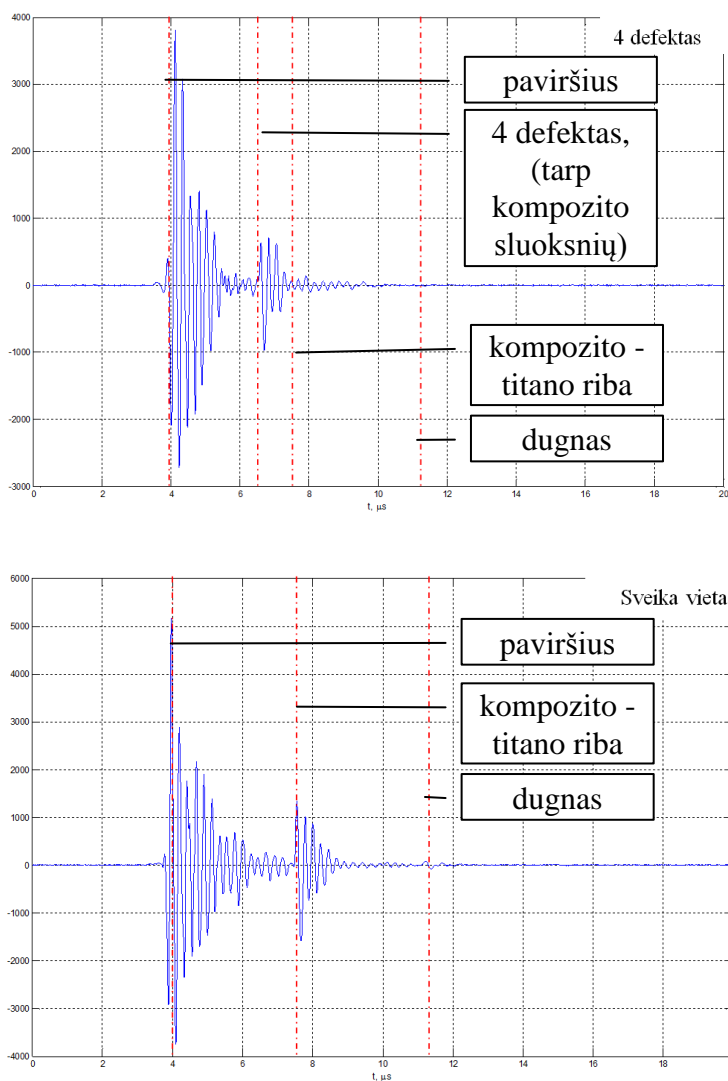
3.2.8 pav. Bandinio B atvaizdas skenuojant iš kompozito pusės skersai bandinio.

3.2.9 paveiksle pavaizduoti A atvaizdai keitikliui esant virš 1 defekto ir virš sveikos vietos lygioje bandinio dalyje. Kaip matoma ties sveika vieta šiame paveiksle galima išskirti 3 atspindžius: nuo kompozito paviršiaus, nuo kompozito – titano ribos, nuo dugno (iš kairės į dešinę punktyrinės linijos). Tuo tarpu virš defekto, esančio ties kompozito – titano riba, atspindžio amplitudė lyginant su sveika vieta sumažėja apie 7 kartus.



3.2.9 pav. Bandinio A atvaizdas ties 1 defektu ir ties sveika vieta.

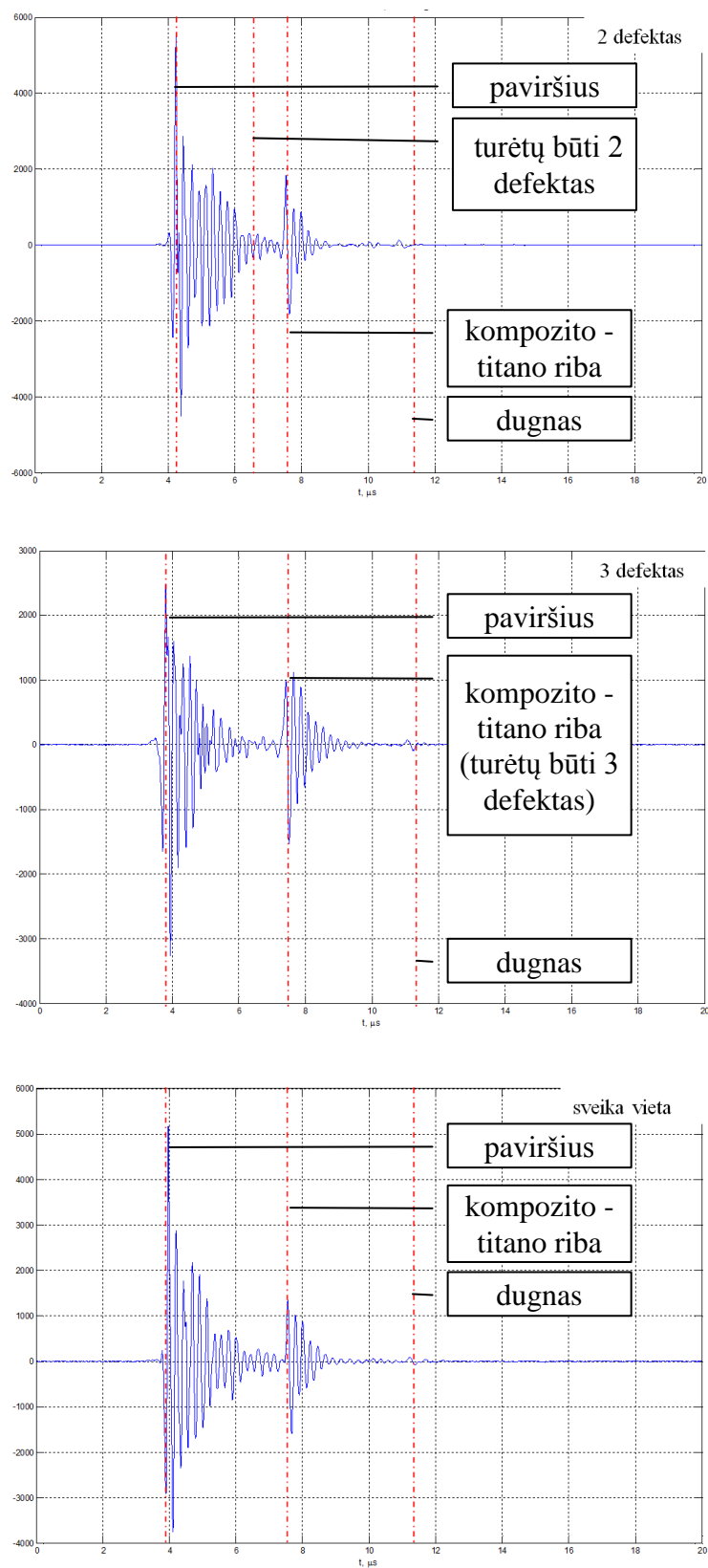
3.2.10 paveiksle pažymėta A atvaizdai keitikliui esant virš 4 defekto, esančio tarp kompozito sluoksnių, ir virš sveikos vietų spygliuotoje bandinio dalyje. Nedefektinėje zonoje galima lengvai išskirti atspindžius nuo paviršiaus, ribos bei dugno. Defektinėje vietoje defektas yra ties 6,5 μs. Atspindys nuo kompozito – titano ribos yra uždengiamas atspindžio nuo defekto, dėl to jo nesimato. Taip pat 4 defekto zonoje atspindžio nuo dugno negalima išskirti.



3.2.10 pav. Bandinio A atvaizdas ties 4 defektu ir ties sveika vieta.

Ties 2 defektu (tarp kompozito sluoksnių) galima išskirti visus atspindžius: nuo bandinio paviršiaus, ribos, dugno, tačiau iš A atvaizdo sunku pasakyti apie defekto buvimą (3.2.11pav.). Apie šio defekto buvimą galima spręsti tik iš amplitudės pokyčio, kuris paveiksle yra labai nežymus (ties 6,5 μs), kad galima būtų identifikuoti nevienalytiškumą.

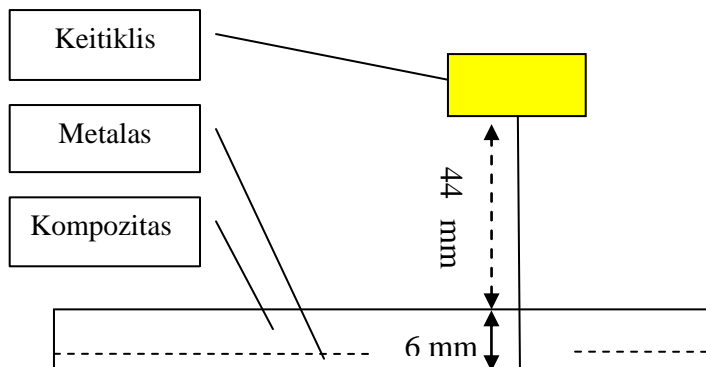
3 defektas, esantis kompozito – titano riboje, turėtų būti ties 7,5 μs riba. Lyginant šią vietą su sveika matoma, kad amplitudės yra beveik vienodos ties riba. Taip pat lyginant šias vietas matoma, kad ir defektinėje ir sveikoje zonose galima išskirti atspindžius nuo dugno, ko 1 defekto esančio tokiam pačiame gylyje signalė nebuvo galima išskirti.



3.2.11 pav. Bandinio A atvaizdas ties 2 defektu, 3 defektu ir ties sveika vieta.

Tyrimas su 15 MHz keitikliu iš kompozito pusės

Naudojant 15 MHz keitiklį skenuota x ir y ašimis 0,1 mm žingsniu. Mažesnis žingsnis pasirinktas dėl aukštesnio keitiklio dažnio, kuris leidžia išgauti didesnę skiriamąją gebą. Keitiklis pozicijuotas 44 mm atstumu nuo bandinio paviršiaus. Taip pat kaip ir naudojant 10 MHz keitiklį fokusuojama į kompozito – metalo ribą (3.2.12 pav.; 3.2.3 Lentelė).

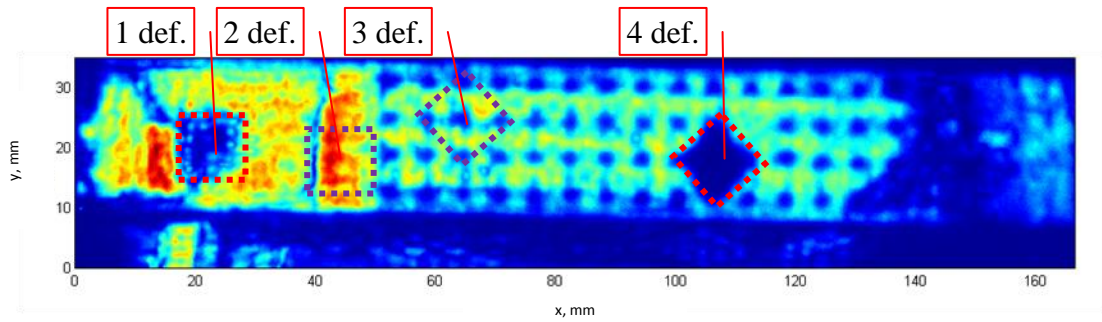


3.2.12 pav. Bandinio ir keitiklio pozicionavimo schema.

3.2.3 Lentelė. Eksperimento parametrai.

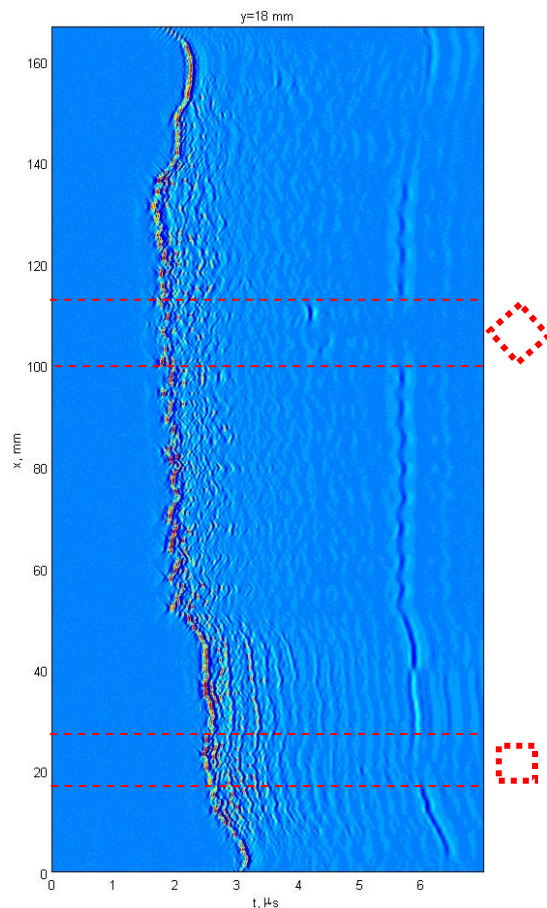
Parametras	Reikšmė
Keitiklio Dažnis	15 MHz
Keitiklio atstumas nuo bandinio	44 mm
Skenavimo ašys	x ; y
Skenavimo zona	166,6 mm x 35,2 mm
Skenavimo žingsnis	0,1 mm

3.2.13 paveiksle pavaizduota bandinio C atvaizdai skenuojant iš kompozito pusės. Kaip matoma paveiksle galima išskirti 1 bei 4 defektus. Kaip ir atliekant matavimus su 10 MHz keitikliu taip ir šiame eksperimente pastebima įtrūkimas prie 2 defekto. 3 bei 2 defektai nėra aptinkami (tamsesniais rėmeliais pažymėta, kur turėtų būti kiti defektai).



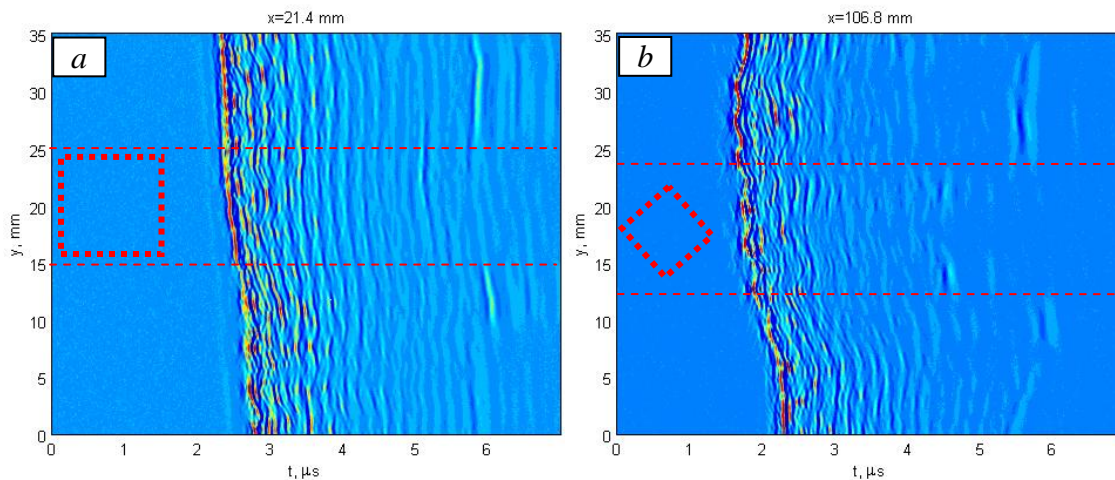
3.2.13 pav. Bandinio C atvaizdas skenuojant su 15 MHz keitikliu.

3.2.14 paveiksle pavaizduotas B atvaizdas skenuojant išilgai bandinio ties 18 mm x ašimi. Šiame paveiksle galima išskirti C atvaizde (3.2.13 pav.) esančius defektus. Ties 18 – 28 mm matomas 1 defektas, ties 40 mm riba matomas trūkis, ties 100 –110 mm 4 defektas. Taip pat kaip ir skenuojant su 10 MHz keitikliu negalima išskirti 2 bei 4 defektų.



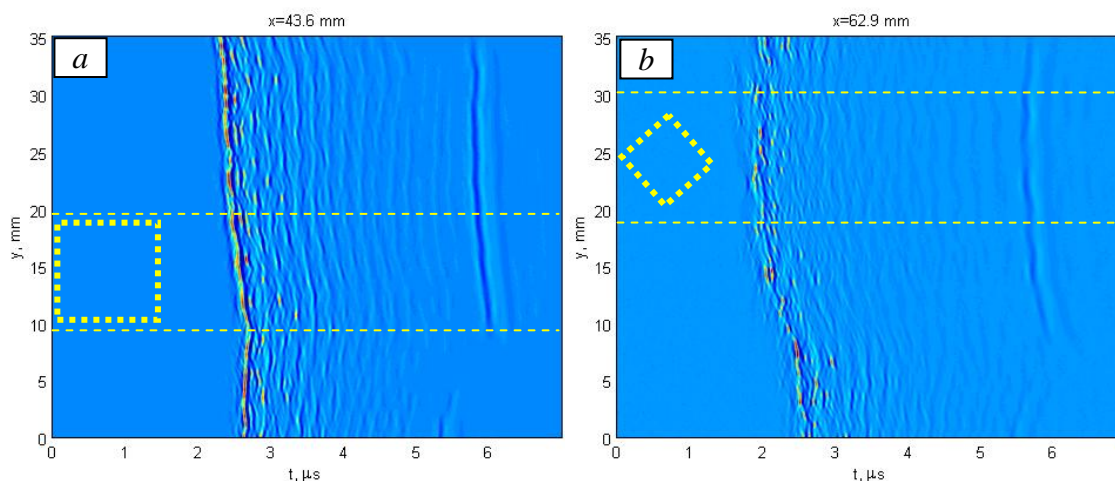
3.2.14 pav. Bandinio B atvaizdas skenuojant iš kompozito pusės išilgai bandinio su 15 MHz keitikliu.

3.2.15 paveiksle parodyti B atvaizdai skersai bandinio ties 1 defektu (15 mm – 25 mm ribose) ir ties 4 defektu (13 mm – 23 mm ribose).



3.2.15 pav. Bandinio B atvaizdas skenuojant iš kompozito pusės ties 1 defektu (a) ir ties 4 defektu (b) skersai bandinio su 15 MHz keitikliu.

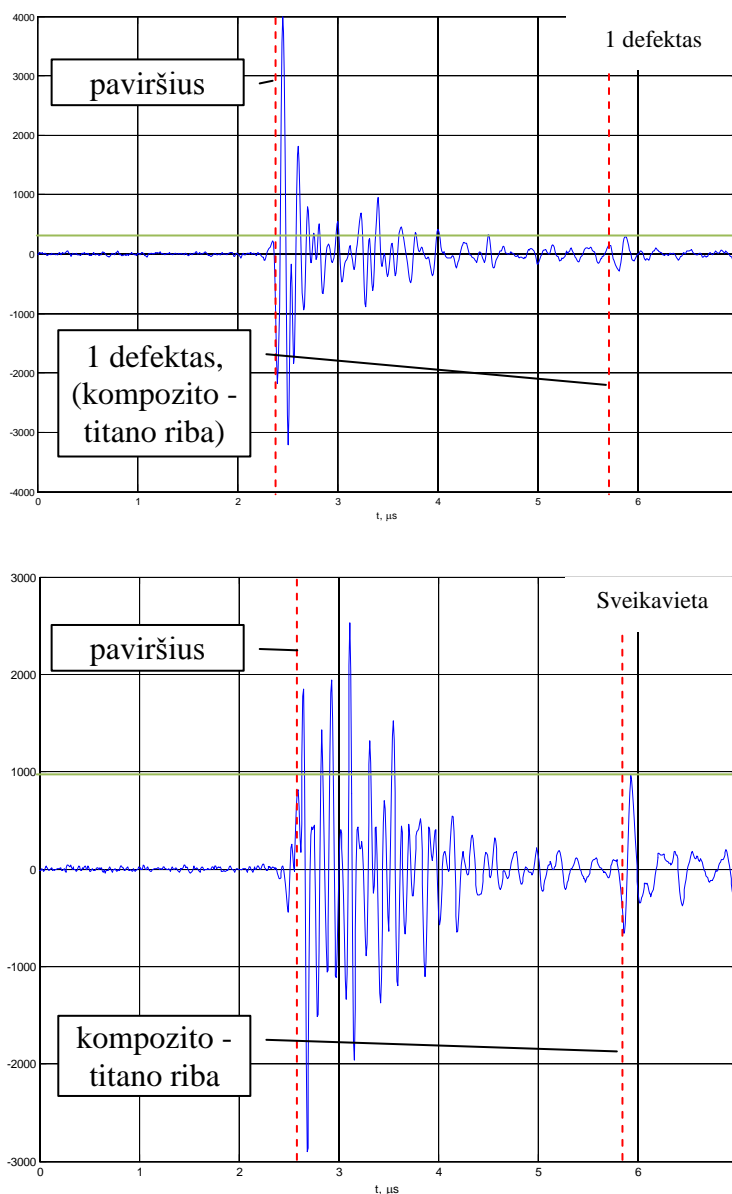
3.2.16 paveiksle pavaizduotas B atvaizdas ties 2 ir 3 defektais, kurio C atvaizde nebuvo galima pastebėti. Paveiksle parodyta skersinis atvaizdas ties 43,6 mm ir 62,9 mm ribomis. 2 defektas turėtų būti 9 – 19 mm ribose, o 3 defektas – 20 – 30 mm ribose. Iš atvaizdo neišeina išskirti šio defekto.



3.2.16 pav. Bandinio B atvaizdas skenuojant iš kompozito pusės skersai bandinio ties 2 (a) ir 3 (b) defektais.

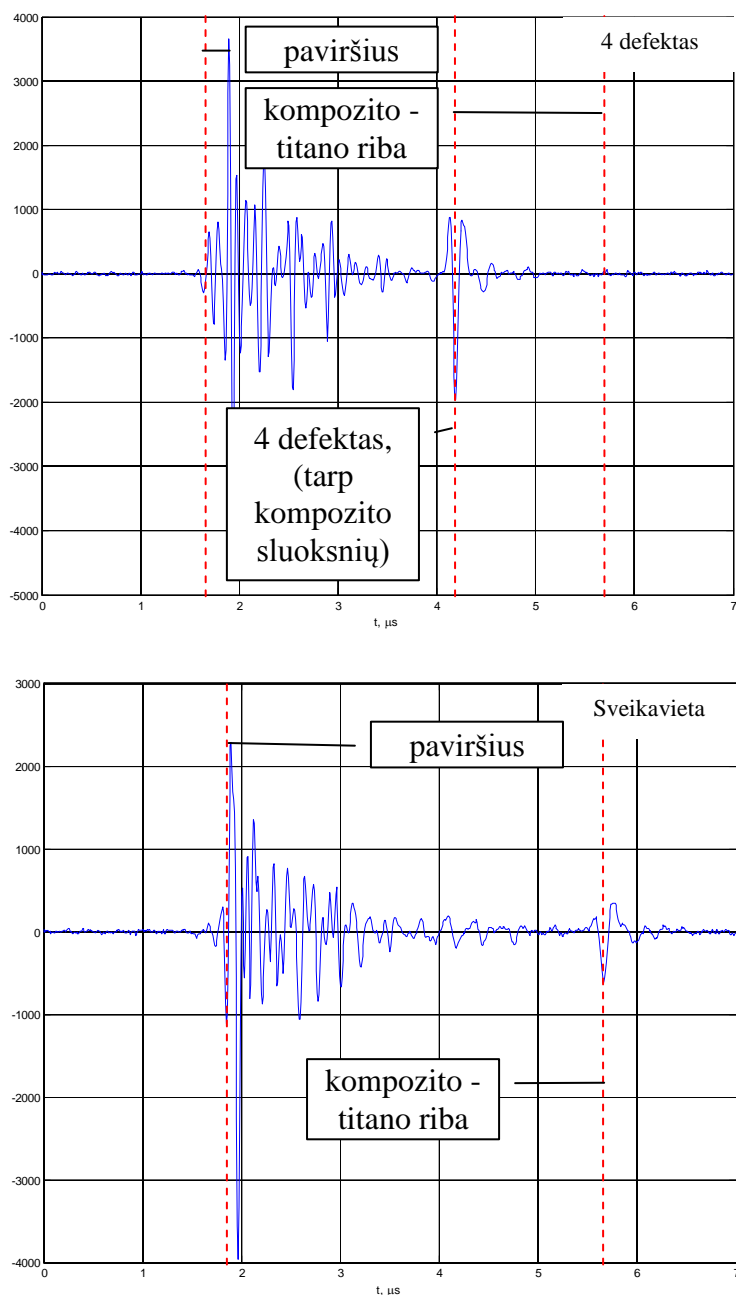
Atliekant eksperimentinius matavimus su 15 MHz keitikliu signalo langas buvo nustatytas, taip kad būtų fiksuojamas laiko intervalas, kuriame yra atspindžiai nuo paviršiaus, defektų ir kompozito – titano ribos. 3.2.17 paveiksle pavaizduoti A atvaizdai keitikliui esant virš 1 defekto ir virš sveikos vietos lygioje bandinio dalyje. Kaip matoma ties sveika vieta šiame paveiksle galima išskirti 2

atspindžius: nuo kompozito paviršiaus (2,5 μ s), nuo kompozito – titano ribos (5,75 μ s). Tuo tarpu virš defekto, esančio ties kompozito – titano riba, atspindžio amplitudė lyginant su sveika vieta sumažėja apie ketvirtį.



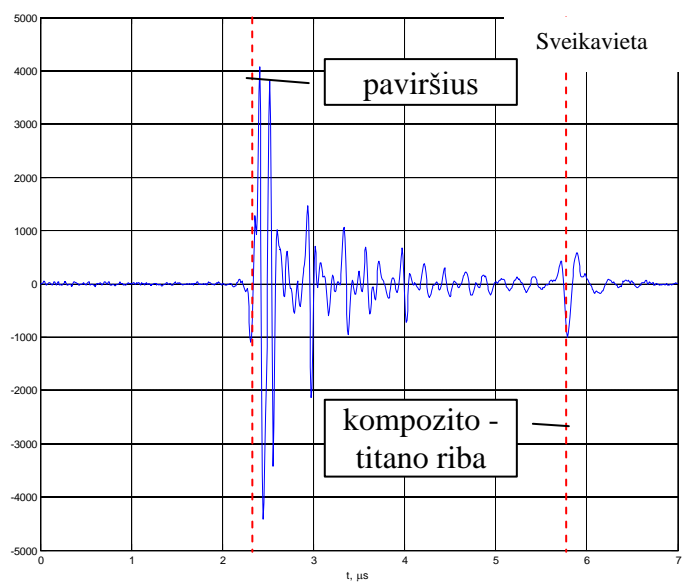
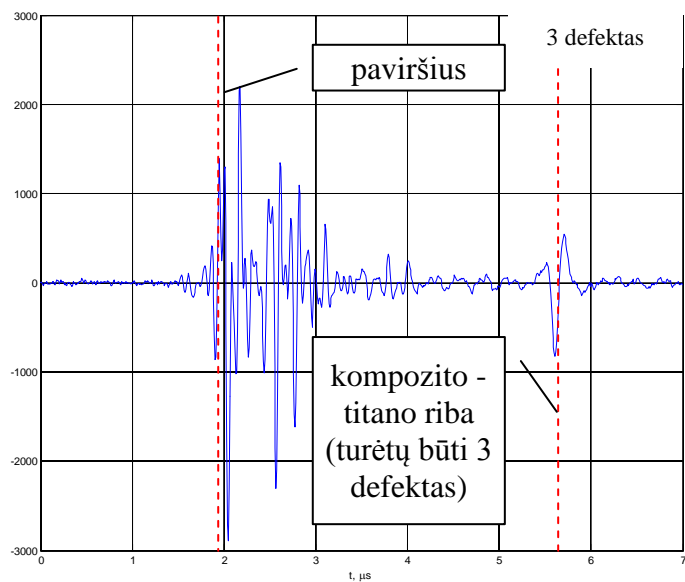
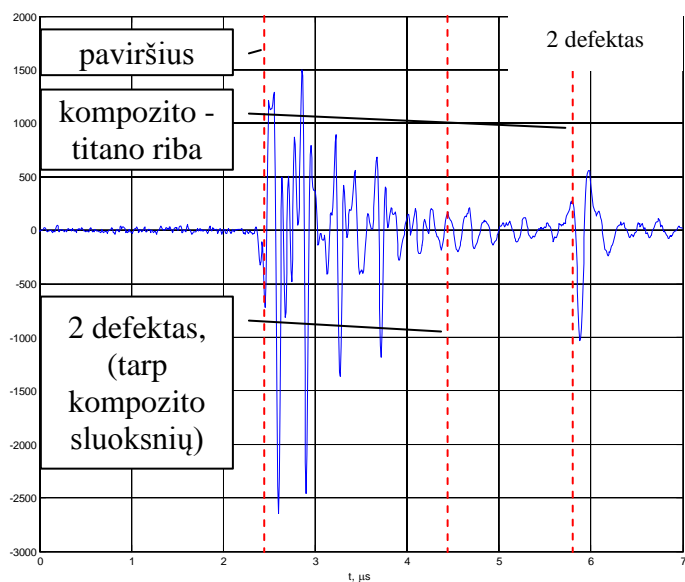
3.2.17 pav. Bandinio A atvaizdas ties 1 defektu ir ties sveika vieta.

3.2.18 paveiksle pažymėta A atvaizdai keitikliui esant virš 4 defekto, esančio tarp kompozito sluoksnių, ir virš sveikos vietų spygliuotoje bandinio dalyje. Nedefektinėje zonoje galima išskirti atspindžius nuo paviršiaus (1,9 μ s) ir nuo ribos (5,8 μ s). Defektinėje vietoje defektas yra ties 4,2 μ s. Atspindys nuo kompozito – titano ribos yra uždengiamas atspindžio nuo defekto, dėl to jo nesimato.



3.2.18 pav. Bandinio A atvaizdas ties 4 defektu ir ties sveika vieta.

Ties 2 defektu (tarp kompozito sluoksnių) galima išskirti visus atspindžius: nuo bandinio paviršiaus, ribos, tačiau iš A atvaizdo sunku pasakyti apie defekto buvimą (3.2.18 pav.). Apie šio defekto buvimą galima spręsti tik iš amplitudės pokyčio, kuris paveiksle yra labai nežymus (ties 4,2 μs), kad galima būtų identifikuoti nevienalytiškumą. 3 defektas, esantis kompozito – titano riboje, turėtų būti ties 5,8 μs riba. Lyginant šią vietą su sveika matoma, kad amplitudės yra beveik vienodos ties riba.



3.2.19 pav. Bandinio A atvaizdas ties 2 defektu, 3 defektu ir ties sveika vieta.

3.3. Apibendrinimas

Buvo nustatyta, kad geriausia metalų kompozitų sujungimus tirti iš kompozito pusės, naudojant 10 MHz fokusuotus keitiklius. Naudojant pasiūlytą metodą pavyko aptikti delaminacijas, kurios buvo ir kompozito – metalo riboje, ir tarp kompozito sluoksnių. Taip pat pavyko aptikti defektą ir sudėtingos geometrijos zonoje (zonoje su spygliais).

Tokio tipo sujungimuose geriausia defektų aptikimo kokybė yra kai defektai randasi kompozito – metalo riboje. Norint aptikti defektus eančius arti sujungimo ribos geriausiai atlikti eksperimentus matuojant iš metalo pusės, jeigu tai leidžia metalo struktūrinės savybės. 2 bei 3 defektus aptikti trukdo stiprus atspindys nuo kompozito – metalo ribos, kuris uždengia defektinės vietos signalą. Pagrindinės problemos tiriant kompozitų ir metalų sujungimus iškyla dėl to, kad kompozitinės medžiagos turi didelį ultragarso slopinimą ir išsklaidymą. Taip pat didelis akustinių varžų nesuderinamumas tarp kompozito ir metalo apsunkina tyrimą.

4. NEAPIBRĖŽTIES ĮVERTINIMAS

Atliekant neardomųjų tyrimų bandymus gautas rezultatas visada turi turėti patikimumą. Remiantis standartizuotu neapibrėžties skaičiavimo vadovu: matavimas yra naudingas tik tada kai yra nurodoma jo neapibrėžtis [22].

Ultragarso greičio matavimo neapibrėžtis kompozite

Ultragarso greičio medžiagoje matavimuose pagrindiniai neapibrėžčių šaltiniai yra bandinio storio išmatavimas, signalo trukmės užfiksavimas [23, 24]. 4.1 lentelėje pateikti kompozitinės dalies storio matavimo duomenys atlikti panaudojant elektroninį slankmatį. Remiantis "GUM" vadovu šiems matavimams taikomas A tipo neapibrėžties įvertinimas. Atlikta 10 matavimų nenutrūkstamų bandymų būdu [22] ir apskaičiuotas aritmetinis vidurkis pagal 4.3 formulę [22] lygus 4,11 mm.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k; \quad (4.3)$$

čia; n – matavimų skaičius; q_k – matavimo reikšmė.

4.1 Lentelė. Kompozitinės dalies storis išmatuotas su slankmačiu.

Matavimo nr.	Matavimo reikšmė, mm
1.	4,15
2.	4,1
3.	4,11
4.	4,08
5.	4,11
6.	4,13
7.	4,06
8.	4,14
9.	4,11
10.	4,07
Vidurkis:	4,11
Stand. neapibrėžtis:	0,01

Vadovaujantis neapibrėžties skaičiavimo vadovu A tipo nepibrėžties standartinis nuokrypis skaičiuojamas pagal 4.4 formulę [22], kuris lygus 0,003.

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2; \quad (4.4)$$

čia; \bar{q} – matavimų rezultatų aritmetinis vidurkis; n – matavimų kiekis; q_j – matavimo rezultatas

Turint standartinį nuokrypį randama standartinė neapibrėžtis pagal 4.5 išraišką [22]. Matavimo standartinė neapibrėžtis lygi 0,01 mm (4.1 Lentelė).

$$u(q_k) = \sqrt{s^2(q_k)}; \quad (4.5)$$

$$u(q_k) = 0,01 \text{ mm}$$

Vertinant laiko, per kurį ultragarso banga nusklinda iki kompozito dugno ir atgal neapibrėžtį buvo atlikta 10 matavimų ir užfiksuoti laikai per, kuriuos signalas nusklinda išmatuotą atstumą (4.2 Lentelė). Remiantis literatūra laikam fiksuoti galima pasirinkti iš kelių būdų: signalas kerta nulinę ribą [25], pagal amplitudžių maksimumus [26], koreliacinis [27]. Šiuose matavimuose pasirinktas metodas, signalo pradžia laikyti kai signalas kerta nulinę ribą. Apskaičiavus vidurkį gauta, kad vidutiniškai

signalas sklinda kompozite iki jo dugno 3,41 μ s. Pasinaudojus 4.4 formule randama matavimo standartinė neapibrėžtis lygi 0,019 μ s.

4.2 Lentelė. Signalų sklaidimo laikai bandinyje.

Matavimo nr.	Signalų sklaidimo laikas, μ s
1.	3,35
2.	3,47
3.	3,39
4.	3,37
5.	3,36
6.	3,4
7.	3,4
8.	3,42
9.	3,38
10.	3,5
Vidurkis:	3,41
Stand. neapibrėžtis:	0,02

Turint ultragarso greičio apskaičiavimo formulę medžiagoje (4.6) randamos kiekvieno įeinančiojo dydžio išvestinės nuo greičio (4.7). Tokiu būdu įvertinami įeinančiųjų į modelį elementų įtakos koeficientai [22]. Iš išraiškos randame, kad storio įtakos koeficientas – 0,66, o laiko – 0,89.

$$V = \frac{2H}{t}; \tag{4.6}$$

čia; H – tiriamojo objekto aukštis, t – signalo sklaidimo laikas medžiagoje.

$$W_H = \frac{\partial V}{\partial H} = \frac{2}{t} = \frac{2}{3,04} = 0,66; \tag{4.7}$$

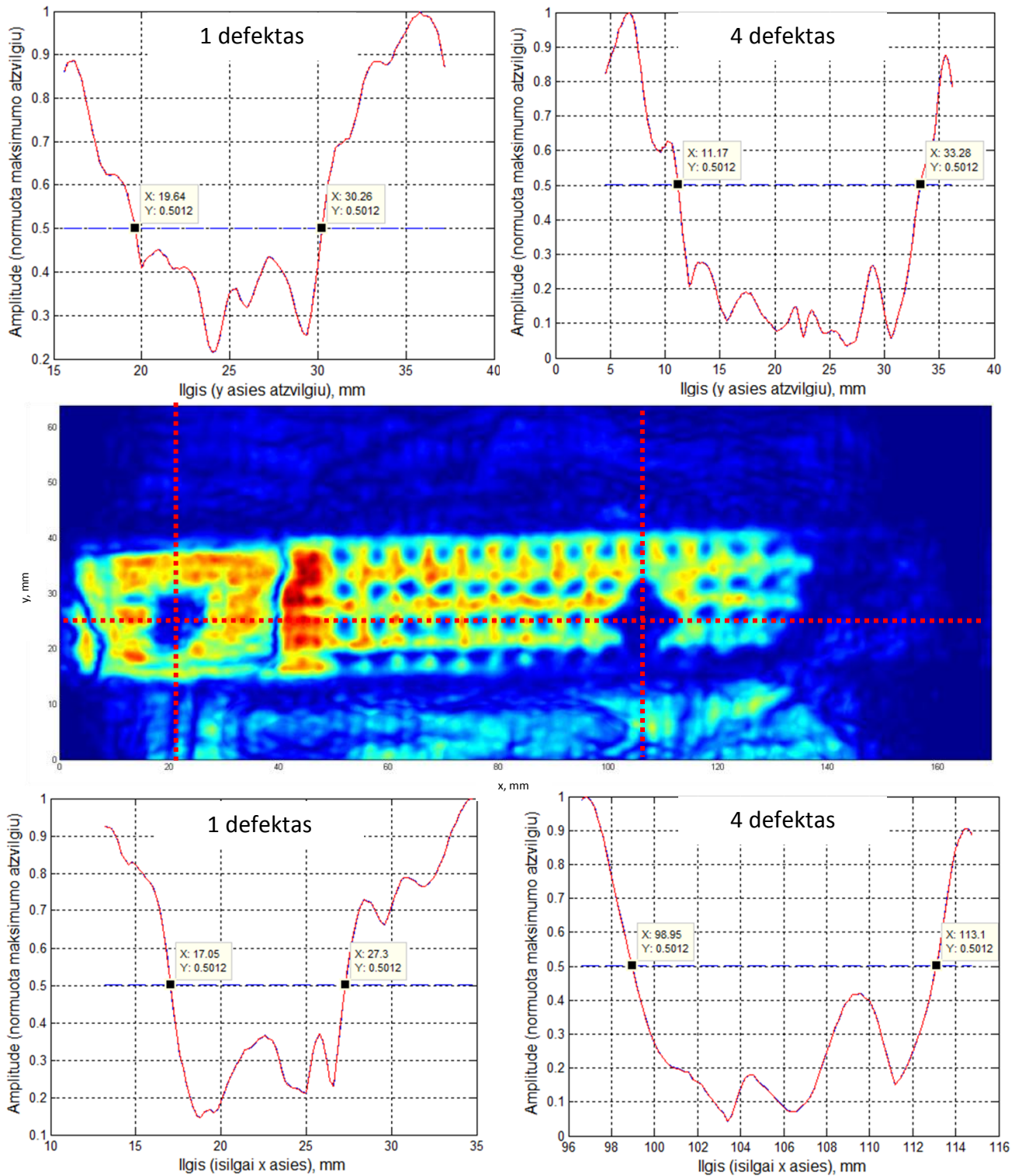
$$W_t = \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{2H}{t^2} = \frac{8,24}{9,24} = 0,89;$$

Modelio standartinė neapibrėžtis randama pagal 4.8 išraišką, kuri lygi 0,06 mm/ μ s.

$$u_{modelio} = \sqrt{W_H^2 \cdot u_H^2 + W_t^2 \cdot u_t^2} = 0.0145 \text{ mm}/\mu\text{s}; \tag{4.8}$$

4.1. Defekto pozicijos nustatymo neapibrėžtis x, y ašimis

Norint nustatyti defekto poziciją x, y ašimis nuspręsta atidėti amplitudžių maksimumus išilgai dominančios ašies, priimant defekto pozicijos taškus, kur amplitudė nukrenta žemiau -6 dB lygio (4.1.1 pav., 4.1.2 pav.). Įvertinus, kad aptikti defektai yra netaisyklingos formos priimta jų pozicijos tašku laikyti defekto centrinės koordinatės skenuoto ploto atžvilgiu.



4.1.1 pav. 10 MHz eksperimento defekto pozicijos x, y ašimis nustatymas.

4.1.1 paveiksle pavaizduota rezultatai atlikus eksperimentą panaudojant 10 MHz keitiklį. Kaip matome iš grafiko kuriame pavaizduota defektas, esantis kompozito – titano riboje (4.1.1 pav. 1 defektas), jo pradžios koordinatė x ašies atžvilgiu atitinkamai yra 17,05 mm, o pabaigos koordinatė – 30,26 mm. Y ašies atžvilgiu šis defektas aptinkamas ties 17,05 mm ir baigiasi ties 27,3 mm. Centrinės defekto koordinatės nustatomos pagal 4.1.1 išraišką;

$$x_c = \frac{x_B - x_A}{2} + x_A, \quad y_c = \frac{y_B - y_A}{2} + y_A; \quad (4.1.1)$$

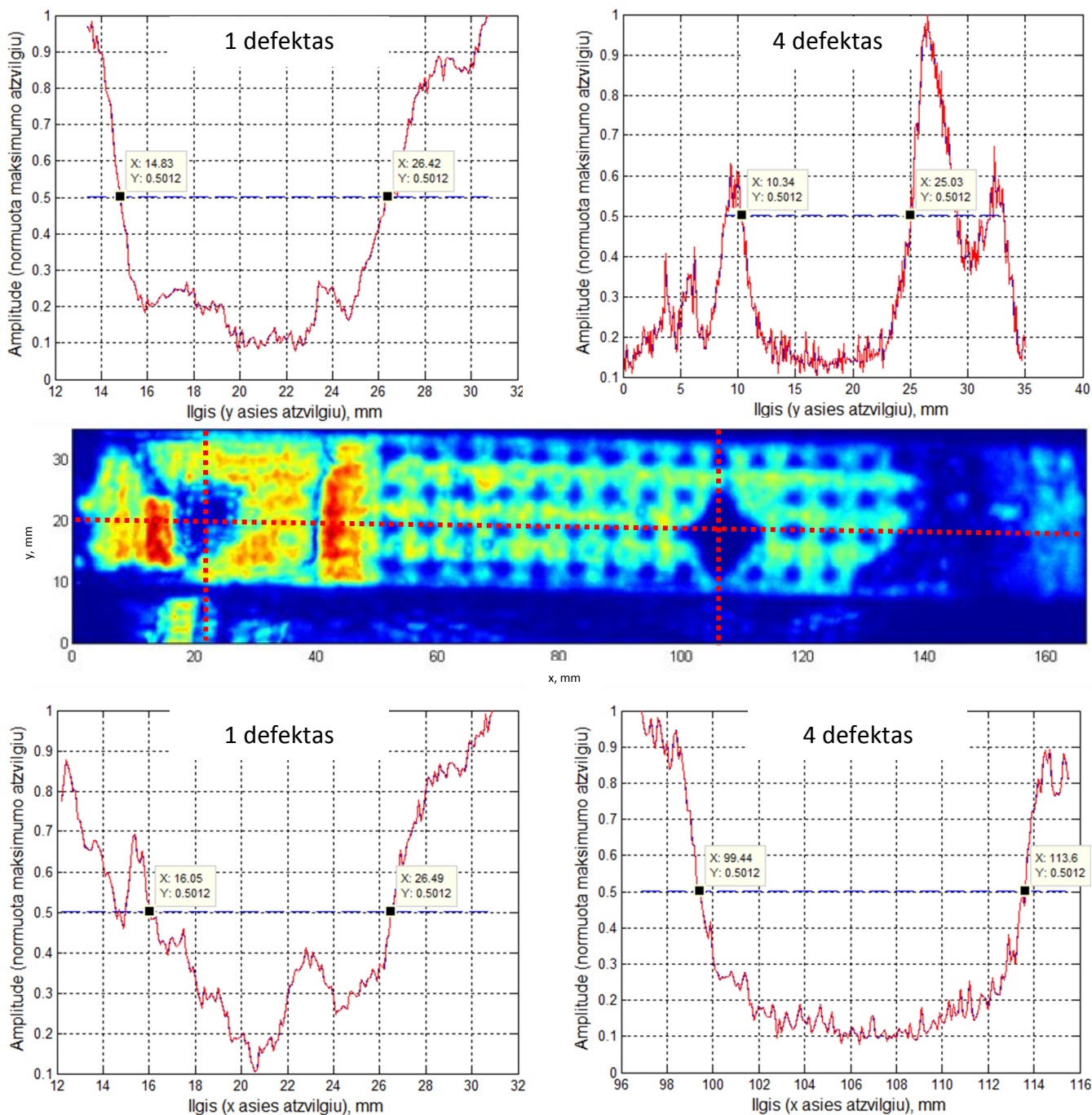
čia; x_c, y_c – defekto centrinės koordinatės (x, y ašys); x_B, y_B – defekto pabaigos koordinatės; x_A, y_A – defekto pradinės koordinatės.

Pritaikius minėtąją išraišką nustatoma, kad defekto, esančio kompozito – titano riboje pozicija yra: $x = 22,18$ mm; $y = 24,95$ mm.

Defekto, esančio tarp kompozito sluoksnių, (4.1.1 pav. 4 defektas) pozicija x ašies atžvilgiu yra nuo 98,95 mm iki 113,1 mm. Y ašies atžvilgiu šios delaminacijos pozicija yra nuo 11,17 mm iki 33,28 mm. Nustatant centrinės koordinatės pagal minėtąją 4.1.1 išraišką gaunama, kad defekto, esančio tarp kompozito sluoksnių, pozicija yra: $x = 106,03$ mm; $y = 22,23$ mm.

4.1.2 paveiksle pavaizduota rezultatai atlikus eksperimentą panaudojant 15 MHz keitiklį. Grafike kuriame pavaizduota defektas, esantis kompozito – titano riboje (4.1.2 pav. 1 defektas), jo pradžios koordinatė x ašies atžvilgiu atitinkamai yra 16,05 mm, o pabaigos koordinatė – 26,49 mm. Y ašies atžvilgiu šis defektas aptinkamas ties 14,83 mm ir baigiasi ties 26,42 mm. Pagal 4.1.1 išraišką nustatyta, kad defekto, esančio kompozito – titano riboje pozicija yra: $x = 21,27$ mm; $y = 20,63$ mm.

Defekto, esančio tarp kompozito sluoksnių, (4.1.1 pav. 4 defektas) pozicija x ašies atžvilgiu yra nuo 99,44 mm iki 113,6 mm. Šios delaminacijos pozicija yra nuo 10,34 mm iki 25,03 mm y ašies atžvilgiu. Nustatant centrinės koordinatės gaunama, kad defekto, esančio tarp kompozito sluoksnių, pozicija yra: $x = 106,52$ mm; $y = 17,69$ mm.



4.1.2 pav. 15 MHz eksperimento defekto pozicijos x , y ašimis nustatymas.

Nustatant defekto poziciją koordinacių ašyse (x , y , z) svarbu atskirti parametrus, kurie įtakoja poziciją atitinkamos ašies atžvilgiu. Nagrinėjant plokštumos ašis (x , y) galima būtų išskirti svarbiausius neapibrėžties šaltinius atliktiems matavimams: skenerio tikslumas, skenavimo žingsnelis bei atsikartojamumo neapibrėžtys [28] (4.1.1 Lentelė).

4.1.1 Lentelė. Pagrindiniai neapibrėžčių šaltiniai nustatant defekto poziciją x , y ašimis.

Neapibrėžtis dėl skenerio tikslumo	u_{acc}	
Neapibrėžtis dėl atsikartojamumo	u_{repeat}	
Neapibrėžtis dėl skenavimo žingsnio	10 MHz eksperimentas	$u_{\Delta x 10MHz}$
	15 MHz eksperimentas	$u_{\Delta x 15MHz}$

4.1.3 lentelėje pateikti „TecScan“ ultragarsinių matavimų sistemos skenerio specifikacijų duomenys reikalingi įvertinti neapibrėžčiai dėl skenavimo įrenginio. Šie duomenys yra paimti iš gamintojo dėl to galima taikyti stačiakampius skirstinius. Apskaičiavus standartines neapibrėžtis dėl skenerio tikslumo, atsikartojamumo x , y ašimis atitinkamai gautos reikšmės 0,006 mm, 0,03 mm. Neapibrėžtis dėl skenavimo žingsnio pritaikius stačiakampį skirstinį atitinkamai yra 0,06 mm (10 MHz eksperimente) ir 0,03 mm (15 MHz eksperimente).

4.1.3 Lentelė. Neapibrėžčių šaltiniai ir jų įverčiai bei galutinė išraiška.

Parametras		Tikslumas		Skenavimo žingsnis		Atsikartojamumas	
		dydis	u	dydis	u	dydis	u
10 MHz	x ašis	$\pm 0,01$ mm	0,006 mm	0,2 mm	0,06 mm	0,05 mm	0,03 mm
	y ašis	$\pm 0,01$ mm	0,006 mm	0,2 mm	0,06 mm	0,05 mm	0,03 mm
15 MHz	x ašis	$\pm 0,01$ mm	0,006 mm	0,1 mm	0,03 mm	0,05 mm	0,03 mm
	y ašis	$\pm 0,01$ mm	0,006 mm	0,1 mm	0,03 mm	0,05 mm	0,03 mm

10 MHz	Suminė neapibrėžtis	0,09 mm	Geriausias įvertis (x , y)	1 defektas	(22,18 mm; 24,95 mm)	Išplėstinė neapibrėžtis U , kai $p = 95 \%$	0,18 mm
				4 defektas	(106,03 mm; 22,23 mm)		
15 MHz	Suminė neapibrėžtis	0,04 mm	Geriausias įvertis (x , y)	1 defektas	(21,27 mm; 20,63 mm)	Išplėstinė neapibrėžtis U , kai $p = 95 \%$	0,08 mm
				4 defektas	(106,52 mm; 17,69 mm)		

4.2. Defekto pozicijos nustatymo neapibrėžtis z ašimi

Nustatinėjant defekto poziciją z ašimi išskiriami tokie pagrindiniai neapibrėžčių šaltiniai: neapibrėžtis dėl keitiklio pozicionavimo atstumo, neapibrėžtis dėl keitiklio fokuso atstumo, neapibrėžtis dėl ultragarso greičio tiriamojoje medžiagoje, neapibrėžtis dėl ultragarso greičio vandenyje, neapibrėžtis dėl laiko, kurį ultragarso banga sklinda iki defekto ir atgal (4.2.1 Lentelė). Taip pat vertinant keitiklio atstumo neapibrėžtį iki bandinio paviršiaus, įvertinta atstumo pokytis dėl keitiklio nestatmenos pozicijos bandinio paviršiaus atžvilgiu.

4.2.1 Lentelė. 10 MHz ir 15 MHz keitiklio z ašies pozicijos pagrindiniai neapibrėžčių šaltiniai.

Neapibrėžtis dėl keitiklio fokuso atstumo	u_F		
Neapibrėžtis dėl fokuso gylio medžiagoje	u_{lm}		
Neapibrėžtis dėl keitiklio atstumo iki bandinio paviršiaus	u_{lv}	Neapibrėžtis dėl keitiklio nestatmenos pozicijos	u_a
Laiko, kurį ultragarso banga sklinda iki defekto ir atgal neapibrėžtis	u_t		
Neapibrėžtis dėl ultragarso greičio vandenyje	u_{cv}		

4.2.1 formulėje pateikiamas defekto gylio nustatymo modelis. Šiame modelyje atspindi pagrindiniai neapibrėžčių šaltiniai nurodyti 4.2.1 lentelėje:

$$H = \frac{t \cdot c_v (F - l_v)}{2l_m}; \quad (4.2.1)$$

čia; t – laikas, kurį ultragarso banga sklido iki defekto ir atgal; c_v – ultragarso greitis vandenyje; F – keitiklio fokuso atstumas; l_v – keitiklio atstumas iki bandinio paviršiaus; l_m – fokusavimo gylis bandinyje.

Nurodytame modelyje (4.2) keitiklio neidealus statmenumas bandinio paviršiui labiausiai įtakoja keitiklio atstumą iki bandinio paviršiaus. Literatūroje nurodyta, kad keitiklio statmenumo neidealumas geriausiu atveju nurodomas $\pm 5^\circ$, blogesniu – $\pm 15^\circ$, blogiausiu atveju nurodoma, kad neidealumas turi būti $\pm 30^\circ$. Šiuo atveju priimamas geriausias atvejis kai neidealumas lygus $\pm 5^\circ$. Ši reikšmė pasirinkta dėl to, kad matavimo sistema „TecScan“ yra pakankamai tiksli pozicionavimo atžvilgiu. Keitiklio pozicionavimo pokytis išreiškiamas 4.2.2 formule:

$$\Delta l_{van} = \frac{l_{van}}{\cos \alpha} - l_{van}; \quad (4.2.2)$$

čia; l_{van} – teorinis keitiklio atstumas iki bandinio paviršiaus; α – pozicionavimo kampo neidealumas.

Iš 4.2.2 formulės išsiskaičiuojama, kad 10 MHz keitiklio atstumo pokytis lygus 0,17 mm, o 15 MHz taip pat 0,17 mm. Atitinkamai standartinė neapibrėžtis abiejų dažnių keitikliams pagal stačiakampį skirstinį bus 0,1 mm (4.2.2 Lentelė).

Norint įvertinti suminę neapibrėžtį dėl keitiklio atstumo iki bandinio paviršiaus taip pat įvertinama ir keitiklio atstumo iki bandinio paviršiaus nustatymo modelio neapibrėžtis (4.2.3 formulė):

$$l_V = F - l_m(c_m/c_V); \quad (4.2.3)$$

čia; l_V – vandens kelias; F – keitiklio fokuso nuotolis; l_M – gylis bandinyje, kuriame norima fokusuoti; c_m – ultragarso greitis bandinyje; c_V – ultragarso greitis vandenyje.

Išsiskaičius gaunama, kad 10 MHz keitiklio atstumas iki bandinio paviršiaus norint fokusuoti į kompozito – titano ribą (4 mm gylyje) yra 43,24 mm su 0,79 mm standartinė neapibrėžtimi. 15 MHz keitiklio atstumas – 45,21 mm su 0,69 mm neapibrėžtimi. Suminė šio modelio neapibrėžtis įtrauks ir atstumo pokytį dėl keitiklio kampo pozicijos, dėl ko 10 MHz keitiklio neapibrėžtis padidės iki 0,89 mm, o 15 MHz keitiklio – iki 0,79 mm (4.2.2 Lentelė). 4.2.2 lentelėje nurodyta ultragarso greičio medžiagoje standartinė neapibrėžtis panaudota iš gautų rezultatų 4 skyriuje įvertinant ultragarso greičio neapibrėžtį 4.2.3 modelyje. Fokuso atstumo neapibrėžtis bei ultragarso greičio vandenyje prie 24 °C neapibrėžtis panaudota paimant jas iš 4.1. poskyrio, kuriame vertinama defektų padėties neapibrėžtis x , y ašimis. Gylio, kuriame norima fokusuoti neapibrėžtis įvertinama priimant, kad norima fokusuoti 4 mm gylyje su 0,1 mm paklaida. Maža fokuso gylio paklaida pasirinkta dėl to, kad konkrečiai žinoma kokiam gylyje norima fokusuoti.

4.2.2 Lentelė. Keitiklio pozicijos iki bandinio paviršiaus nustatymo neapibrėžtis.

Neapibrėžtis	10 MHz		15 MHz	
	\bar{x}	u_x	\bar{x}	u_x
Neapibrėžtis dėl keitiklio nestatmenos pozicijos u_α , mm	0,17	0,1	0,17	0,1
Neapibrėžtis dėl keitiklio fokuso taško u_F , mm	49,68	0,7	51,65	0,66
Neapibrėžtis dėl fokuso gylio medžiagoje u_{lm} , mm	4	0,06	4	0,06
Neapibrėžtis dėl ultragarso greičio vandenyje u_{cV} , mm/ μ s	1,494	0,01	1,494	0,01
Neapibrėžtis dėl ultragarso greičio medžiagoje u_{cm} , mm/ μ s	2,405	0,015	2,405	0,015
\bar{x} , $u_{\text{suminė}}$, mm	43,24	0,89	45,21	0,79

4.2.3 lentelėje pavaizduoti laikai, kurių ultragarso banga sklinda iki defekto ir atgal. Laikai fiksuoti po 10 kartų skirtinguose gyliuose esantiems defektams ir skirtingo eksperimento metu. Iš duomenų (4.2.3 Lentelė) matoma, kad iki kompozito – titano riboje esančio defekto ir atgal su 10 MHz keitikliu ultragarso banga vidutiniškai sklido 3,39 μs su 0,01 μs standartine neapibrėžtimi. 15 MHz eksperimente tame pačiame gylyje esančio defekto vidutinis laikas lygus 3,42 μs su 0,03 μs standartine neapibrėžtimi. Iki tarp kompozito sluoksnių esančiame defekte ir atgal 10 MHz eksperimente banga vidutiniškai sklido 2,53 μs su 0,03 μs standartine neapibrėžtimi. 15 MHz eksperimente defektas tarp kompozito sluoksnių – 2,55 μs su 0,02 μs standartine neapibrėžtimi.

4.2.3 Lentelė. Laiko, kurių ultragarso banga sklinda iki defekto ir atgal nustatymas.

Nr.	10 MHz		15 MHz	
	Laikas iki defekto ir atgal, esančio tarp metalo ir kompozito ribos, μs	Laikas iki defekto ir atgal, esančio tarp kompozito sluoksnių, μs	Laikas iki defekto ir atgal, esančio tarp metalo ir kompozito ribos, μs	Laikas iki defekto ir atgal, esančio tarp kompozito sluoksnių, μs
1.	3,35	2,52	3,38	2,57
2.	3,47	2,49	3,27	2,63
3.	3,39	2,51	3,6	2,54
4.	3,37	2,61	3,4	2,43
5.	3,36	2,5	3,47	2,64
6.	3,4	2,58	3,49	2,58
7.	3,4	2,66	3,29	2,44
8.	3,42	2,37	3,47	2,56
9.	3,38	2,49	3,48	2,52
10.	3,5	2,59	3,35	2,54
Vidurkis:	3,39	2,53	3,42	2,55
Standartinė neapibrėžtis:	0,01	0,03	0,03	0,02

4.2.4 Lentelėje parodyta į 4.2.1 formulėje nurodytą modelį įeinančių neapibrėžčių šaltinių standartinės neapibrėžtys bei suminė standartinė neapibrėžtis 10 MHz bei 15 MHz eksperimentams. Šioje lentelėje nustatyta standartinė suminė neapibrėžtis atskirai skirtinguose gyliuose esantiems defektams. 10 MHz eksperimente nustatyta, kad kompozito – titano riboje esantis defektas randasi 4,1 mm gylyje nuo kompozito paviršiaus su 0,68 mm sumine standartine neapibrėžtimi. Defektas

esantis tarp kompozito sluoksnių yra 3,05 mm gilyje su 0,51 mm sumine standartine neapibrėžtimi. 15 MHz eksperimente nustatyta, kad defektas kompozito – titano riboje yra taip pat 4,1 mm gilyje su 0,65 mm sumine standartine neapibrėžtimi. Defektas tarp kompozito sluoksnių nustatytas 3,06 mm gilyje su 0,48 mm sumine standartine neapibrėžtimi.

4.2.4 Lentelė. Eksperimento atlikto su 10 MHz ir 15 MHz keitikliais defektų pozicijos nustatymo z ašimi neapibrėžtys.

Neapibrėžtis šaltinis	10 MHz				15 MHz			
	Defektas kompozito – titano riboje		Defektas tarp kompozito sluoksnių		Defektas kompozito – titano riboje		Defektas tarp kompozito sluoksnių	
	\bar{x}	u_x	\bar{x}	u_x	\bar{x}	u_x	\bar{x}	u_x
Neapibrėžtis dėl laiko, kurį ultragarso banga sklinda iki defekto ir atgal u_t , μs	3,39	0,01	2,53	0,03	3,42	0,03	2,55	0,02
Neapibrėžtis dėl ultragarso greičio vandenyje u_{cv} , mm/ μs	1,494	0,005	1,494	0,005	1,494	0,005	1,494	0,005
Neapibrėžtis dėl keitiklio atstumo iki bandinio paviršiaus u_{ivan} , mm	43,24	0,89	43,24	0,89	45,21	0,79	45,21	0,79
Neapibrėžtis dėl keitilio fokuso atstumo u_F , mm	49,68	0,7	49,68	0,7	51,65	0,66	51,65	0,66
Neapibrėžtis dėl fokuso gylis medžiagoje u_{lm} , mm	4	0,06	4	0,06	4	0,06	4	0,06
Suminė standartinė neapibrėžtis, mm	4,1	0,68	3,05	0,51	4,1	0,65	3,06	0,48

4.2.5 lentelėje atvaizduota 10 MHz ir 15 MHz eksperimentų defektų galutiniai įvertinimai z ašimi pritaikius stačiakampį skirstinį. Matoma, kad 10 MHz eksperimente defektas kompozito – titano riboje nustatytas 4,1 mm gilyje su 1,1 mm išplėstine neapibrėžtimi kai $p = 95 \%$, o defektas tarp kompozito sluoksnių 3,05 mm gilyje su 0,84 mm išplėstine neapibrėžtimi kai $p = 95 \%$. 15 MHz eksperimente defektas kompozito – titano riboje nustatytas 4,1 mm gilyje su 1,1 mm išplėstine neapibrėžtimi kai $p = 95 \%$, o defektas tarp kompozito sluoksnių 3,06 mm gilyje su 0,8 mm išplėstine neapibrėžtimi kai $p = 95 \%$.

4.2.5 Lentelė. Išplėstinė eksperimentų neapibrėžtis nustatinėjant defektų poziciją z ašimi.

Defekto pozicija z ašimi	10 MHz		15 MHz	
	\bar{x}	$U_x, k = 1,63$	\bar{x}	$U_x, k = 1,63$
Defektas kompozito – titano riboje, mm	4,1	1,1	4,1	1,1
Defektas tarp kompozito sluoksnių, mm	3,05	0,83	3,06	0,8

4.3. Apibendrinimas

Eksperimente panaudojant 10 MHz keitiklį defektas kompozito – titano riboje aptinkamas centrinėse koordinatėse: x ašyje $22,18 \text{ mm} \pm 0,18 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$) ir y ašyje $24,95 \text{ mm} \pm 0,18 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$). Defektas esantis tarp kompozito sluoksnių – x ašyje $106,03 \text{ mm} \pm 0,18 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$) ir y ašyje $22,23 \text{ mm} \pm 0,18 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$).

Eksperimente panaudojant 15 MHz keitiklį defekto kompozito – titano riboje pozicija yra taške: x ašyje $21,27 \text{ mm} \pm 0,08 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$) ir y ašyje $20,63 \text{ mm} \pm 0,08 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$). Defektas esantis tarp kompozito sluoksnių: x ašyje $106,52 \text{ mm} \pm 0,08 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$) ir y ašyje $17,69 \text{ mm} \pm 0,08 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$).

Vertinant neapibrėžtį z ašies atžvilgiu eksperimente su 10 MHz keitikliu defektas esantis kompozito – titano riboje aptinkamas $4,1 \text{ mm} \pm 1,1 \text{ mm}$ ($k = 1,63$ bet kokiai p) gylyje. Defektas esantis tarp kompozito sluoksnių aptinkamas $3,05 \text{ mm} \pm 0,83 \text{ mm}$ ($k = 1,63$ bet kokiai p) gylyje. Eksperimente su 15 MHz keitikliu defektas kompozito – titano riboje – $4,1 \text{ mm} \pm 1,1 \text{ mm}$ ($k = 1,63$ bet kokiai p) gylyje. Defektas tarp kompozito sluoksnių $3,06 \text{ mm} \pm 0,8 \text{ mm}$ ($k = 1,63$ bet kokiai p) gylyje.

IŠVADOS

- Išnagrinėjus literatūrą nustatyta, kad delaminacijų aptikimui plonuose metalų ir kompozitų sujungimuose tyrimui geriausia naudoti impulsinį aido metodą ir aukšto dažnio fokusuotuosius keitikius (10 – 15 MHz).
- Kompiuterinio modeliavimo būdu nustatyta, kad bandinį geriausiai būtų tirti iš kompozitinės dalies pusės naudojant 10 MHz fokusuotuosius keitiklius dėl to, kad metalinė dalis dėl savo vidinės struktūros smarkiai slopina signalą ir atspindžiai nuo defektų duoda daug silpnesnį atspindį negu tiriant iš kompozitinės pusės arba tiriant su 15 MHz keitikliu.
- 10 MHz keitiklis pasirinktas kaip tinkamesnis, nes jis spinduliuoja aukštesnės amplitudės signalą ir nėra taip slopinamas kaip 15 MHz keitiklio. Nors su 15 MHz keitikliu pasiekama aukštesnė skiriamoji geba, bet dėl bandinio sudėtingos struktūros reikalingi stipresnės amplitudės atspindžiai nuo defektų.
- Naudojant pasiūlytą metodą pavyko aptikti delaminacijas, kurios buvo ir kompozito – metalo riboje, tarp kompozito sluoksnių. Taip pat pavyko aptikti defektą ir sudėtingos geometrijos zonoje (zonoje su spygliais).
- Defekto kompozito – titano riboje panaudojant 10 MHz keitiklį vietos nustatymo neapibrėžtis: x ašyje $22,18 \text{ mm} \pm 0,18 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$), y ašyje $24,95 \text{ mm} \pm 0,18 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$) ir z ašyje $4,1 \text{ mm} \pm 1,1 \text{ mm}$ ($k = 1,63$ bet kokiai p). Defekto, esančio tarp kompozito sluoksnių vietos nustatymo neapibrėžtis: x ašyje $106,03 \text{ mm} \pm 0,18 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$), y ašyje $22,23 \text{ mm} \pm 0,18 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$) ir z ašyje $3,05 \text{ mm} \pm 0,83 \text{ mm}$ ($k = 1,63$ bet kokiai p) gylyje.
- Defekto kompozito – titano riboje panaudojant 15 MHz keitiklį vietos nustatymo neapibrėžtis: x ašyje $21,27 \text{ mm} \pm 0,08 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$), y ašyje $20,63 \text{ mm} \pm 0,08 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$) ir z ašyje $4,1 \text{ mm} \pm 1,1 \text{ mm}$ ($k = 1,63$ bet kokiai p) gylyje. Defekto, esančio tarp kompozito sluoksnių vietos nustatymo neapibrėžtis: x ašyje $106,52 \text{ mm} \pm 0,08 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$), y ašyje $17,69 \text{ mm} \pm 0,08 \text{ mm}$ ($p = 95 \%$) ir z ašyje $3,06 \text{ mm} \pm 0,8 \text{ mm}$ ($k = 1,63$ bet kokiai p) gylyje.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- [1] Joanthan M.Allin, Disbond detection in adhesive joints using low frequency ultrasound, Londono universitetas, p. 28 – 42, 2002, [žiūrėta 2014.01.19],
prieiga per internetą: <https://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/50531700.PDF>
- [2] R. A. Smith, Composite defects and their detection, *Materials science and engineering*, vol. 3, UNESCO Encyclopedia of Life Support System (EOLSS), 2009, p. 4 – 7.
- [3] Insight NDT equipment, Non – Destructive Testing Methods and Applications,
<http://www.insight-ndt.com/ndt-methods.html>, [žiūrėta 2014.05.06].
- [4] A.Kapadia, Non destructive testing of composite materials, National Composites Network, 2008, p. 4 – 11, [žiūrėta 2014.01.19], prieiga per internetą:
<http://compositesuk.co.uk/system/files/documents/ndtofcomposites.pdf>
- [5] R. M. Jones, Mechanics of composite materials, Second edition p. 12 – 17; 55 – 67, 1999.
- [6] Hyungoo Cho, Ultrasonic sensing of mechanical anisotropy in chopped fiber composite using shear vibration, Jutos universitetas, 2007, p. 16 – 23, [žiūrėta 2014.01.19], prieiga per internetą:
<http://content.lib.utah.edu/utils/getfile/collection/etd2/id/892/filename/2050.pdf>.
- [7] P.Kelly, Solid Mechanics, Auklando universitetas, 2015, p. 143 – 153; 156 – 166 [žiūrėta 2014.03.10], prieiga per internetą:
<http://homepages.engineering.auckland.ac.nz/~pkel015/SolidMechanicsBooks/index.html>
- [8] E.Jasiūnienė, Ultragarsinė medžiagotyra, Kauno technologijos universitetas, 2007, p. 33 – 34.
- [9] R.Unnþórsson , M. T. Jonsson ir T. P. Runarsson, Ndt methods for evaluating carbon fiber composites, Islandijos universitetas, p. 5 – 7, 2004, [žiūrėta 2015.02.11], prieiga per internetą:
https://notendur.hi.is/~runson/Project/comptest2004_paper.pdf
- [10] J. L. Rose, J. J. Ditri, Pulse – echo and through transmission lamb wave techniques for adhesive bond inspection, British Journal of NDT, Vol 34 Nr. 12, 1992.
- [11] R. Gr. Maev, S. Titov, Pulse – echo ultrasonic nde of adhesive Bonds in automotive assembly, Vindzoro universitetas, Kanada, 2006, p. 2 – 4, [žiūrėta 2014.01.19], prieiga per intrnetą:
<http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/P27.pdf>
- [12] A. Ganapathi, Pulse – echo ultrasonic testing of adhesive bonded joints for automotive applications, Clemson universitetas, p. 64 – 76, 2010, [žiūrėta 2014.01.19], prieiga per internetą:
http://etd.lib.clemson.edu/documents/1306858719/Ganapathi_clemson_0050M_11046.pdf
- [13] R. J. Freemantleand R. E. Challis, Ultrasonic compression wave ndt of adhesively bondeda utomotive structures, NDT net Vol. 02 Nr.5, 1997.

- [14] M. J. Santos, J. Perdigão, P. Faia, Propagation of ultrasonic lamb waves in adhesively bonded lapjoints, 4 – oji tarptautinė neardomųjų tyrimų konferencija, Coimbra universitetas, 2007, [žiūrėta 2014.01.19], prieiga per internetą:
<http://www.ndt.net/article/hsndt2007/files/Santos.pdf>
- [15] P. K. Puthillath, Fei Yan, H. Kannajosyula, C. J. Lissenden, J. L. Rose, Chunguang XU, Inspection of adhesively bonded joints using ultrasonic guided waves, 17 – oji pasaulinė neardomųjų bandymų konferencija, 2008, [žiūrėta 2014.01.19], prieiga per internetą:
<http://www.ndt.net/article/wcndt2008/toc.htm#402>
- [16] V. Mustafa, A. Chahbaz, D. R. Hay, M. Brassard, S. Dubois, Imaging of disbond in adhesive joints with lamb waves, NDT net Vol. 02 Nr. 03, 1997.
- [17] T. Stepinski, M. Jonsson, Narrow band ultrasonic spectroscopy for nde of layered structures, NDTnet Vol. 9 No.11, Uppsala universitetas, 2004.
- [18] W. Lis, J. Schmidt, Measuring the impedance of ultrasonic transducers, Gdanskio technologijų universitetas, 2013, p. 2 – 5, [žiūrėta 2014.01.19], www.pta-gdansk.pl/artykuły7/lis%20mpedancja-ang-korekta.pdf
- [19] Ultrasonic transducers, Technical notes, olympus, panametrics ndt, 2006, p. 41 – 45, [žiūrėta 2014.11.15], prieiga per internetą: <https://www.olympus-ims.com/data/File/panametrics/UT-technotes.en.pdf>
- [20] U. S. Department of Transportation, Aviation Maintenance Technician Handbook — Airframe, Vol. 1, 2012, p. 171 – 227.
- [21] E. Jasiūnienė, E. Žukauskas, V. Samaitis, Ultragarsinių matavimų laboratoriniai darbai, Kauno technologijos universitetas, prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institutas, 2013, p. 73.
- [22] Joint Committee for Guides in Metrology, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, Pirmas leidimas, 2008, p. 4 – 51.
- [23] Farhang Honarvar, Mohammad Iran – Nejad, Ali Gholami, Anthony N. Sinclair, Estimation of Uncertainty in Ultrasonic Thickness Gauging and Improvement of Measurements by Signal Processing, 5th International CANDU In – Service Inspectional Workshop in conjunction with the NDT in Canada 2014 Conference, Toronto universitetas, 2014, p. 1 – 4.
- [24] B. C. A. Silva, J. E. F. Oliveira, Application of a Methodology for Measuring Aerospace Parts by Ultrasonic Considering the Measurement Uncertainty through Analytical and Monte Carlo Simulation Method, International Journal of Engineering & Technology IJET–IJENS Vol. 13 No. 02, 2013, p. 104 – 110.

- [25] M. Kupnik, E. Krasser, M. Groschl, Absolute transit time detection for ultrasonic gas flowmeters based on time and phase domain characteristics, 2007 IEEE Ultrasonics Symposium, p. 142 – 145.
- [26] C. D. Latino, N. L. Andersen, F. Voss, Detection of time of arrival of ultrasonic pulses, Journal of Physics: Conference Series 52, 2006, p. 14–26.
- [27] J. M. Villadangos, J. Ureña, J. JesúsGarcía, M. Mazo, Á. Hernández, A. Jiménez, D. Ruíz C. DeMarziani, Measuring Time – of – Flight in an Ultrasonic LPS System Using Generalized Cross – Correlation, Sensors, doi:10.3390/s111110326, 2011, p. 10326 – 10324.
- [28] P. Hammond, On resolution, Accuracy and calibration of digital ultrasonic thickness gauges, NDTnet – October 1997, Vol.2 No.10.

PRIEDAI

Priedas 1. 12th Student Scientific Conference on Electronics, Energy, Telecommunications and Automation E2TA – 2015, straipsnis „Defektų nustatymas ultragarsu kompozitų ir metalų sujungimuose“