



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Kompozitinio sklandytuvo lonžerono kokybės įvertinimas
ultragarsu

Baigiamasis magistro projektas

Gytautas Statkonis
Projekto autorius

Doc. dr. Elena Jasiūnienė
Vadovė

Kaunas, 2018



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Kompozitinio sklandytuvo lonžerono kokybės įvertinimas ultragarsu

Baigiamasis magistro projektas
Aeronautikos inžinerija (621H40001)

Gytautas Statkonis
Projekto autorius

Doc. dr. Elena Jasiūnienė
Vadovė

Lekt. Robertas Mikalauskas
Recenzentas

Kaunas, 2018



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Gytautas Statkonis

Kompozitinio sklandytuvo lonžerono kokybės įvertinimas ultragarsu

Akademiniio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Gytauto Statkonio, baigiamasis projektas tema „Kompozitinio sklandytuvo lonžerono kokybės įvertinimas ultragarsu“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Turinys

IVADAS	11
1. NEARDOMOSIOS KONTROLĖS METODŲ, TINKAMŲ SUDĖTINGOS GEOMETRIJOS KOMPOZITAMS TIRTI, ANALIZĖ	12
1.1. TYRIMO OBJEKTAS	12
1.1.1. <i>Anglies pluoštu armuotas plastikas CFRP</i>	14
1.2. AVIACIJOJE NAUDOJAMŲ NEARDOMOSIOS KONTROLĖS METODŲ APŽVALGA	15
1.2.1. <i>Vizualiniai metodai</i>	15
1.2.2. <i>Sūkurinių srovių metodas</i>	16
1.2.3. <i>Magnetinių dalelių metodas</i>	17
1.2.4. <i>Rentgeno spindulių metodas</i>	17
1.2.5. <i>Skverbiklių metodas</i>	18
1.2.6. <i>Ultragarso metodas</i>	18
1.3. IMPULSINIS AIDO METODAS	19
1.4. PERDAVIMO METODAS	22
1.5. IMERSINIS METODAS	23
1.6. MATAVIMAI PER ORO TARPĄ	24
1.7. KEITIKLIŲ GARDELĖS.....	26
1.8. KOMPIUTERINĖ TOMOGRAFIJA.....	28
1.9. APIBENDRINIMAS IR TINKAMIAUSIO METODO PASIRINKIMAS.....	30
2. KOMPIUTERINIS MODELIAVIMAS	31
2.1. TIRIAMO OBJEKTO BANDINIO MODELIO KŪRIMAS CIVI APLINKOJE.....	31
2.2. ULTRAGARSINIO KEITIKLIO LAUKAS.....	34
2.3. MODELIAVIMO REZULTATAI	36
2.4. TYRIMAS NAUDOJANT KEITIKLIŲ GARDELES.....	41
2.5. KOMPIUTERINĖ TOMOGRAFIJA.....	46
2.6. DEFEKTAI PAGAL KOMPIUTERINĖS TOMOGRAFIJOS REZULTATUS	48
2.6.1. <i>Matavimai su 3.5 MHz gardele</i>	49
2.6.2. <i>Matavimai su 5 MHz gardele</i>	51
2.7. APIBENDRINIMAS.....	54
3. EKSPERIMENTINĖ DALIS	54
3.1. ULTRAGARSO GREIČIO NUSTATYMAS TIRIAMAME BANDINYJE.....	56
3.2. MATAVIMAI SU 5 MHz GARDELE	60
3.3. MATAVIMAI 3,5 MHz GARDELE	62
3.4. APIBENDRINIMAS.....	64
IŠVADOS	65
LITERATŪROS SĄRAŠAS	66

Paveikslų sąrašas

1 pav. Sklandytuvo lonžeronas pagamintas iš CFRP.....	12
2 pav. Polimerinės matricos gamyba iš preprego	13
3 pav C - tipo vaizdas vaizduojantis poringumą kompozite	13
4 pav. Bandinio vaizdas gautas kompiuterine tomografija	14
5 pav. A tipo vaizdai gaunami impulsinio aido metodu priklausomai nuo pažeidimo (a - mažas pažeidimas ultragarso spindulyje, b - du maži pažeidimai ultragarso spindulyje, c - didelis pažeidimas, kuris uždengia mažą pažeidimą ir objekto dugną, d - didelis įstrižas pažeidimas, kuris uždengia objekto dugną, e - mažas pažeidimas, tačiau aidas neatsispindi nuo objekto dugno, nes dugnas įstrižas, f - didelis ultragarso slopinimas, dėl medžiagos nevientisumo, ultragarsas nepasiekia nei pažeidimo nei objekto dugno)	20
6 pav. Slopinimas tam tikruose plastikuose	21
7 pav a) Eksperimentu gauti signalo rezultatai b)-d) baigtinių elementų metodu gauti signalo rezultatai	21
8 pav. Perdavimo metodo schema 1 – vandens žarnelė, 2 – keitiklis, kuris veikia kaip siūstuvai, 3 – vandens čiurkšlė 4 - keitiklis, kuris veikia kaip imtuvai	22
9 pav. A tipo vaizdai, gaunami perdavimo metodu	22
10 pav Imersinio metodo schema	23
11 pav. CFRP strypelių inspekcija matuojant imersiniu būdu: a) eksperimento schema, b) C tipo vaizdas	24
12 pav. Ultragarsinis matavimas per oro tarpą: a) struktūrinė schema, b) eksperimento įrangos nuotrauka	25
13 pav. a) A tipo vaizdas b) matavimo įranga ir keitiklis	26
14 pav. Pavyzdys su įlenkimo pažeidimu	27
15 pav. keitiklių gardelės	27
16 pav. Keitiklių gardelės signalo fokusavimas	28
17 Pav. Elektroninis gardelių spindulio valdymas a) linijinis skenavimas b) fokusavimas c) pasukimas	28
18 pav. a) Rentgeno spindulių aparatas b) bandinio vaizdas ant stalelio	29
19 Pav. Poringumo tyrimo metodas a) juodų pikselių santykis lyginant su visais vaizdo pikseliais b) Kompiuterinės tomografijos būdu gautas vaizdas	29
20 pav. Modelio vaizdai su matmenimis	31
21 pav. Defektų išsidėstymas modelyje.....	34

22 pav. CIVA aplinkoje gautas artimas laukas a) Artimas ir tolimas laukas, b) akustinės slėgio amplitudės maksimumas, c) keitiklis ir jo spinduliuojami laukai, raudona spalva pažymėtas tolimas, geltona – artimas laukas.....	36
23 pav. Jautrumo zonos dydis.....	37
24 pav. Modelis su keitikliu, defektais, jautrumo zona ir keitiklio judėjimo linija.....	38
25 pav. a) B-vaizdas; b) A-vaizdas; c) 3D vaizdas.....	38
26 pav. Signalų amplitudės priklausomybė nuo defekto gylio.....	39
27 pav. Sumažinti defektai A- vaizdo amplitudės palyginimui.....	39
28 pav. Signalų amplitudės priklausomybė nuo defekto dydžio.....	40
29 pav. Gardelės elementų aktyvinimas skenuojant.....	41
30 pav. Linijinės gardelės parametrai:.....	42
A - Aktyvioji apertūra; W - pasyvioji apertūra; e - elemento plotis; g – tarpas tarp elementų; p – atstumas tarp dviejų gretimų elementų centrų.....	42
31 pav. a) fokusavimas keliuose taškuose b) fokusavimas keliuose gyliuose.....	43
32 pav. Gardelės modelis.....	43
33 pav. Tyrimas naudojant gardelę a) nefokusuota b) fokusavimas keliuose taškuose c) fokusavimas keliuose gyliuose.....	44
34 pav. Signalų amplitudės priklausomybė nuo defekto dydžio.....	45
35 pav. Signalų amplitudės priklausomybė nuo defekto gylio.....	46
36 pav. Kompiuterinės tomografijos rezultatai.....	46
37 Pav. Bandinio struktūros vaizdai įvairiuose gyliuose.....	47
38 pav. defektai pagal kompiuterinės tomografijos rezultatus.....	48
39 pav. Tyrimo naudojant 3,5 MHz kontaktinės gardelės modelis.....	49
40 pav. Amplitudės priklausomybė nuo defektų poringame kompozite.....	50
41 pav. 3,5 MHz gardelės matavimo rezultatai.....	51
42 pav. 5 MHz kontaktinės gardelės modelis.....	51
43 pav. 5 MHz gardelės matavimo rezultatai.....	53
44 pav. Olympus OmniScan MX matavimo sistema.....	55
45 pav. Matavimo struktūrinė schema.....	55
46 pav. Naudojamas keitiklis ir kalibravimo plokštelė.....	56
47 pav. Matavimai ultragarso greičiui nustatyti.....	57
48 pav. Ultragarso signalai laiko srityje.....	59
49 pav. Matavimas su 5 MHz gardele.....	60
50 pav. A ir S tipo vaizdai su 5 MHz gardele.....	61
51 pav. Matavimas su 3,5 MHz gardele.....	62

52 pav. A ir S tipo vaizdai su 3,5 MHz gardele	63
53 pav. A ir S tipo vaizdai su 3,5 MHz gardele	64

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Anglies pluoštų savybės	14
2 lentelė. CFRP medžiagos charakteristikos.....	15
3 lentelė Metodo pritaikymas, privalumai ir trūkumai	16
4 lentelė. Metodo pritaikymas, privalumai ir trūkumai	16
5 lentelė. Metodo pritaikymas, privalumai ir trūkumai	17
6 lentelė. Metodo pritaikymas, privalumai ir trūkumai	17
7 lentelė. Metodo pritaikymas, privalumai ir trūkumai	18
8 lentelė. Metodo pritaikymas, privalumai ir trūkumai	19
9 lentelė. Sluoksnių išsidėstymas.....	32
10 lentelė. Standumo matrica (GPa) – tamprumo savybės	32
11 lentelė. Defektų koordinatės, atstumai nuo paviršiaus ir spinduliai	33
12 lentelė. Pagrindiniai medžiagų parametrai.....	37
13 lentelė. Sumažinti defektai A - vaizdo amplitudės palyginimui	40
14 lentelė. Gardelių charakteristikos.....	42
15 lentelė. Defektai A - vaizdo amplitudės palyginimui	44
16 lentelė. Matavimų rezultatų palyginimas	53
17 lentelė. 5 MHz paprasto keitiklio parametrai.....	56
18 lentelė Ultragarso greičio matavimo rezultatų lentelė	59
19 lentelė. 5MHz gardelės matavimo parametrai	60
20 lentelė. 5MHz gardelės matavimo parametrai	62

Statkonis, Gytautas. Kompozitinio sklandytuvo lonžerono kokybės įvertinimas ultragarsu. Magistro baigiamasis projektas / vadovė doc. dr. Elena Jasiūnienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: Ultragarasas, gardelės, kompozitas, lonžeronas, CFRP, poringumas

Kaunas, 2018. 68 p.

Santrauka

Darbo tikslas yra įvertinti sudėtingos geometrijos kompozitinio lonžerono, pagaminto iš anglies pluoštu armuoto plastiko, kokybę tiriant ultragarsu. Tikslui pasiekti iškelti uždaviniai: atlikti literatūros analizę ir parinkti tinkamiausią tyrimo metodą, sukurti kompiuterinį modelį ir atlikti kompiuterinę tyrimo simuliaciją, atlikti realų eksperimentą. Atliekant panašius tyrimus susiduriama su bandinio geometrinio sudėtingumo, ultragarso signalo slopinimo dėl defektų kiekio, tinkamo ultragarso dažnio parinkimo problemomis. Siekiant išspręsti šias problemas ir įvertinti bandinio kokybę, išanalizuota literatūra ir atliktas kompiuterinis modeliavimas leido nustatyti, kad realų bandinį geriausia tirti fazuotomis žemo dažnio (3,5 MHz ir 5 MHz) gardelėmis. Taip pat sukūrus eksperimento kompiuterinį modelį nustatyta ultragarso signalo priklausomybė nuo defektų esančių, bandinyje. Atlikus realų eksperimentą, bandinyje rasti defektai ir įrodytas gardelių tinkamumas aviacinių kompozitinių detalių kokybei įvertinti gamybinėmis sąlygomis.

Statkonis, Gytautas. The evaluation of the quality of composite glider longeron by ultrasound. Master's Final Degree Project supervisor doc. dr Elena Jasiūnienė; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: Ultrasound, CFRP, glider, longeron, phased array, porosity.

Kaunas, 2018. 68 pages.

Summary

The aim of this thesis is to evaluate the quality of complex geometry glider longeron, made of carbon fibre reinforced plastic, by ultrasound. To achieve the aim, following tasks were raised: to analyze the literature and choose the most suitable inspection method, to design a computer model and to perform non-destructive testing simulation, to conduct the real experiment. In subject and similar research, problems such as the complex geometry of specimen, attenuation of ultrasound due to porosity content, proper choice of ultrasound frequency are encountered. To solve these problems and to evaluate the quality of the specimen, literature sources were analyzed and computer model was designed which gave the results that the best option for the real experiment is to use 3,5 MHz and 5 MHz phased array transducers, as well as the results of the computer model, helped to determine the ultrasound signal and defects in specimen dependency. During the experiment, defects were successfully located which resulted in the final conclusion that the ultrasound phased array is one of the best quality assurance methods for in-service aerospace composite structures.

Ivadas

Sparčiai vystantis technologijoms aviacijos srityje, vis dažniau keliami didesni reikalavimai naujoms medžiagoms iš kurių gaminamos tiek mažų tiek didelių orlaivių struktūros. Siekiama gaminti orlaivius, kurie būtų kuo lengvesni, tačiau tuo pačiu neprarastų savo stiprumo savybių. Šioje srityje nepralenkami yra kompozitai, kurie, lyginant su metalais yra tokie pat, o kartais net stipresni, daug mažesnio svorio ir patvaresni. Viena iš tokių medžiagų yra anglies pluoštu armuotas plastikas (CFRP), kuris turi geresnę masės ir stiprumo santykį, lyginant su metalais ir yra daug atsparesnis nuovargiui ir korozijai. Apibendrinant galima teigti, jog anglies pluoštu armuotas plastikas yra lengvesnis už aliuminį, stipresnis už geležį ir atsparesnis korozijai tiek už aliuminį, tiek už geležį.

Visgi, gaminant sluoksniuotus kompozitus, tokius kaip CFRP, neišvengiama gamybinių defektų. Sluoksniuojant sudėtingos konstrukcijos gaminius, tam tikrose vietose gan dažnai atsiranda oro tarpelių, kurie sumažina struktūros atsparumą apkrovų metu. Dėl to labai svarbu iš anksto nustatyti ar gaminys defektuotas.

Neardomoji kontrolė yra geriausias būdas patikrinti gaminį jo nepažeidžiant. Vienas iš populiariausių metodų kompozitinėms medžiagoms tirti yra ultragarso metodas. Tiriant medžiagas ultragarso metodu galima aptikti paviršinius ir vidinius pažeidimus. Šiuo metodu lengva naudotis, gaunami patikimi rezultatai, kurie matomi iškart, metodą galima taikyti gamybinėmis sąlygomis.

Darbo tikslas yra sklandytuvo lonžerono, kuris pagamintas iš anglies pluoštu armuoto plastiko (CFRP), kokybės nustatymas ultragarso metodu. Tyrimui atlikti iškelti uždaviniai:

- Atlikti neardomosios kontrolės metodų analizę ir nustatyti geriausiai tinkantį metodą, sudėtingos geometrijos kompozitinėms detalėms tirti;
- Sukurti kompiuterinį modelį ir atlikti kompiuterinę tyrimo simuliaciją, kuri leistų nustatyti tinkamiausią tyrimo metodą ir parinkti geriausius realaus matavimo parametrus, kurie bus naudojami eksperimente;
- Eksperimentiškai patikrinti kompiuteriniu modeliavimu parinktų metodikų tinkamumą gaminių iš anglies pluoštu armuoto plastiko kokybės patikrai.

1. Neardomosios kontrolės metodų, tinkamų sudėtingos geometrijos kompozitams tirti, analizė

Atliekant analizę labai svarbu tiksliai įvertinti tyrimo objektą ir jo gamybos kriterijus bei nustatyti kokie metodai yra tinkamiausi objektui tirti, kad būtų galima gauti tiksliausius rezultatus.

Toliau darbe bus analizuojamas anglies pluošto (CFRP) sklandytuvo lonžeronas ir defektai atsirandantys gamybos procese. Taip pat galimi ultragarso tyrimo metodai, leidžiantys įvertinti ir nustatyti sudėtingos geometrijos kompozitinių objektų pagaminimo kokybę.

1.1. Tyrimo objektas

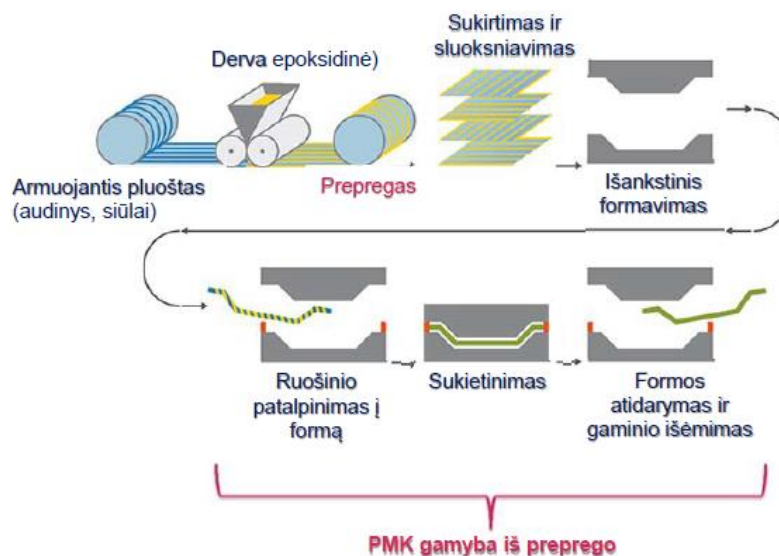
Šiame darbe bus tiriamas lengvojo sklandytuvo lonžeronas pagamintas iš anglies pluoštu armuoto plastiko (CFRP) (1 pav.). Gaminant sluoksniuotus kompozitus pagrindinis ir dažniausiai atsirandantis defektas yra poringumas [19]. Pagrindinė poringumo atsiradimo priežastis yra nepakankamas sukietinimo (cheminio susiuvimo) laikas autoklave [4] ir netinkamas garų pašalinimas dėl kurio atsiranda mikro ar makro oro burbuliukai (poros) [23].



1 pav. Sklandytuvo lonžeronas pagamintas iš CFRP

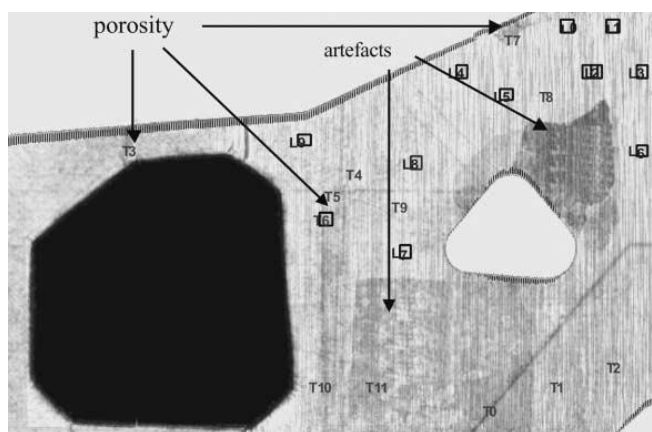
Sluoksniuoto kompozito gamybos procesas pavaizduotas 2 paveiksle. Naudojant naujausias kompozitų gamybos technologijas poringumo santykis tūrio atžvilgiu buvo sumažintas iki 5% [19].

Visgi, tam tikras poringumo kiekis tam tikrose vietose kartu su poringumo išsidėstymu gali turėti didžiulę įtaką kompozitinio komponento mechaniniam stiprumui, ypač tose vietose, kur gaminys apkraunamas labiausiai [19]. Nustatyta, kad poringumo kiekis viršijantis 2,5 % gali gerokai sumažinti gaminio mechaninį stiprumą [14].



2 pav. Polimerinės matricos gamyba iš preprego [5]

A.G Stamopoulos, et al [19] atlikę anglies pluošto (CFRP) poringumo įtakos mechaninėms gaminio savybėms tyrimą, nustatė, kad poringumo kiekis turi tiesioginę įtaką kompozitinio komponento mechaninėms savybėms. Didėjant porų skaičiui prastėja stiprumas ir tamprumas, o apkrovos vietose poringumas greitina gaminio irimo procesą [19].



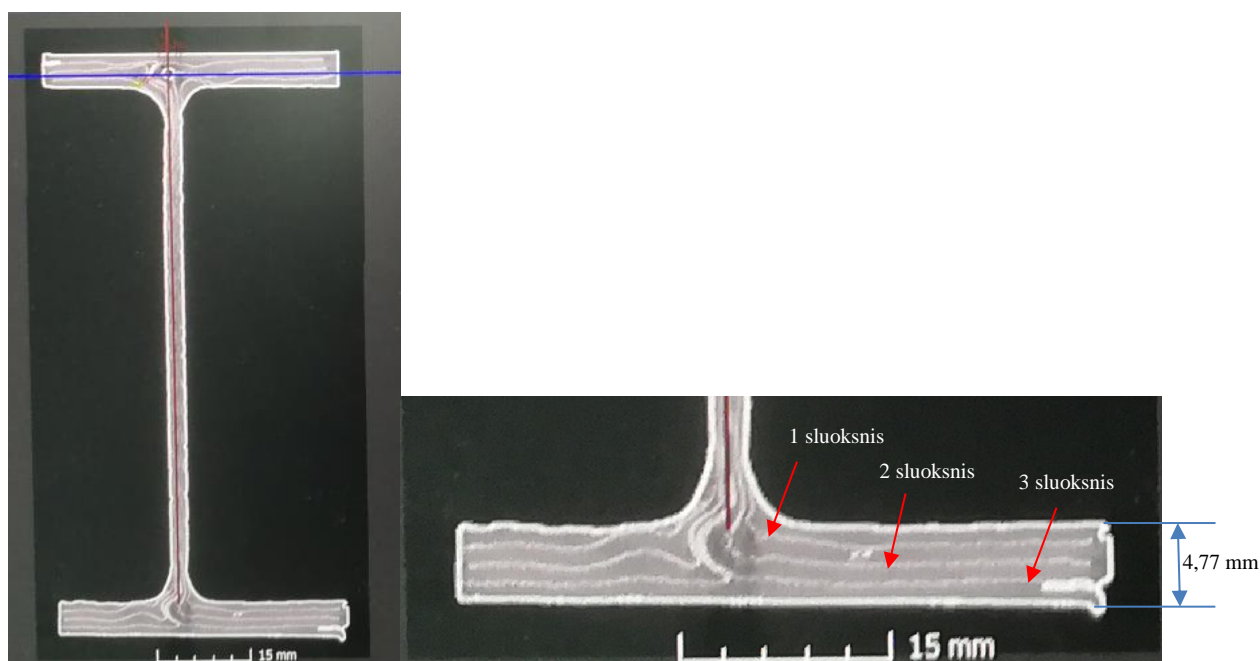
3 pav C - tipo vaizdas vaizduojantis poringumą kompozite [3]

Vieni iš svarbiausių kriterijų aviacijos srityje yra saugumas, gaminių patikimumas ir patvarumas [3]. Dėl šios priežasties yra būtina tiksliai įvertinti gaminius su defektais ir užkirsti kelią jų naudojimui. Geriausias būdas atlikti gaminių patikrinimą yra neardomoji kontrolė. Savo straipsnyje tyrėjas A. Ciliberto, et al [3] nustatė, kad geriausi neardomosios kontrolės būdai aviacinėms

kompozitinėms medžiagoms tirti yra ultragaršas ir kompiuterinė tomografija. 3 paveiksle pavaizduotas C tipo vaizdas gaunamas naudojant ultragarso metodą. Puikiai matyti, kad ultragarso metodo pagalba galima nesunkiai aptikti poringumą kompozite. Taip pat ultragarso metodas yra paprastesnis naudojimo atžvilgiu lyginant su kompiuterinės tomografijos metodu.

1.1.1. Anglies pluoštu armuotas plastikas CFRP

Anglies pluoštu armuotas plastikas sutrumpintai angl. CFRP yra kompozitinis polimeras, kurį sudaro anglies pluoštas (armuojanti medžiaga) ir epoksidinė derva (matrica). Šiame darbe tiriamas bandinys sudarytas iš trijų anglies pluošto sluoksnių, kurie sutvirtinti epoksidine derva 4 pav.



4 pav. Bandinio vaizdas gautas kompiuterine tomografija

Pagrindinės anglies pluoštų savybės pateikiamos 1 lentelėje.

1 lentelė. Anglies pluoštų savybės [5]

Rodiklis	Gauti iš PAN			Mezofaziniai	
	HS	IM	HM	HM	UHM
Skersmuo, μm	7–8	6–7	6–7	10	
Tampros modulis, GPa	230–240	230–250	350–450	380	690
Stipris tempiant, GPa	3,0–3,5	4,0–4,5	2,0–2,5	2,1	2,4
Ištįsa, %	1,3–1,4	1,7–1,8	0,5–0,6		
Tankis, g/cm^3	1,74–1,78	1,74–1,78	1,78–1,84	2,0	
Savitoji šiluminė talpa, $\text{kal}/(\text{g}\cdot\text{K})$	0,17		0,17		
Šiluminio plėtimosi koeficientas, 10^{-6}K^{-1}	-0,7		-1,2		
Savitoji elektrinė varža, $\Omega\cdot\text{cm}$	0,0015–0,0016		0,0008–0,001	0,00075	0,0003

Epoksidinės dervos pasižymi geromis sukietinimo savybėmis. Jas galima lengvai ir greitai sukietinti plačiame temperatūros diapazone – nuo 5 °C iki 150 °C. Viena iš geriausių epoksidinių dervų savybių yra maža santrauka sukietinant. Tai leidžia sumažinti vidinių įtempių dydį gaminyje [5].

2 lentelėje patektos pagrindinės CFRP charakteristikos.

2 lentelė. CFRP medžiagos charakteristikos

Medžiaga	CFRP
Tankis, ρ	1500 kg/m ³
Jungo modulis, E	1.5 GPa
Šlyties modulis, G	53 GPa
Puasono koeficientas, ν	0,28
Takumo riba, σ_Y	200 MPa
Garso greitis	~3000 m/s, tačiau priklausomai nuo medžiagos sudėties gali kisti


Svarbu paminėti, kad kompozitinėse medžiagose minėtos charakteristikos gali kisti priklausomai nuo medžiagos sudėties, sluoksnių, pagaminimo būdų. Šiame tyrime svarbiausios charakteristikos bus ištytos ir matavimai atliekami atsižvelgiant būtent į tiriamo objekto savybes.

1.2. Aviacijoje naudojamų neardomosios kontrolės metodų apžvalga

Neardomoji kontrolė aviacijoje užima labai svarbią vietą. Neardomosios kontrolės paskirtis - aptikti ir įvertinti įvairius pažeidimus, kurie gali turėti įtakos orlaivio tinkamumui skraidyti nesuardant tiriamo objekto. Neardomosios kontrolės metodais galima aptikti ankstyvus konstrukcijos pažeidimus ir užkirsti kelią tolimesniam jų didėjimui. Aviacijoje naudojamos tam tikros neardomosios kontrolės procedūros, kurios yra paruošiamos pagal kiekvieną orlaivį. Šias procedūras ruošia orlaivių gamintojai. Aviacijoje naudojami šeši neardomosios kontrolės metodai. Kiekvienas iš jų skiriasi savo įranga, veikimo principu, aptikimo rezultatais ir pan.

1.2.1. Vizualiniai metodai

Vizualiniai metodai sudaro apie 80 % visų neardomosios kontrolės procedūrų. Tai paprasčiausi ir ekonomiškiausi metodai. Pilotai, antžeminė komanda ir techninės priežiūros specialistai lėktuvą vizualiai patikrina prieš kiekvieną skrydį. Atlikti vizualinę apžiūrą kartais užtenka naudojant tik šviesos šaltinį ir padidinamąjį stiklą, tačiau kartais naudojami ir boroskopai. Boroskopais atliekamos vidinės variklio, piono ir kitų sunkiai pasiekiamų vietų inspekcijos [12].


Metodo pavadinimas	Pritaikymas	Privalumai	Trūkumai
Vizualiniai metodai 	Paviršiaus apgadinimo, įtrūkimų ar struktūros pažeidimų aptikimas visose medžiagose	Paprasta naudoti tose vietose, kuriose kiti metodai nepraktiški. Optiniai prietaisai padidina metodo galimybes.	Patikimumas priklauso nuo naudotojo gabumų ir patirties. Prieinamumas reikalauja tiesioginio optinių prietaisų kontakto. Netinka vidiniams pažeidimams

1.2.2. Sūkurinių srovių metodas

Sūkurinių srovių metodas - antras po vizualinių pagal naudojimą, neardomosios kontrolės metodas. Šio metodo veikimas paremtas elektromagnetiniais dėsniais.

Sūkurinių srovių metodu galima išmatuoti tik paviršiuje ar tam tikrame, palyginti nedideliame gylyje esančius įtrūkimus. Sūkurinių srovių stiprumas (tankis) mažėja eksponentiškai gilyn į medžiagą. Kai jų stiprumas pasiekia 37 % nuo paviršiaus stiprumo, tas gylis laikomas standartiniu skvarbos gyliu. Standartinis skvarbos gylis reikalingas norint nustatyti gylį, kuriame signalo jautrumas išlieka pakankamai stiprus, kad būtų galima aptikti ypač mažus defektus [12]. Skvarbos gylis mažėja didėjant srovės dažniui (f). Taip pat skvarbos gyliui įtakos turi magnetinė skvarba (μ) ir medžiagos laidumas (σ) [12].


4 lentelė. Metodo pritaikymas, privalumai ir trūkumai [12]

Metodo pavadinimas	Pritaikymas	Privalumai	Trūkumai
Sūkurinių srovių metodas 	Paviršiaus defektų, įdubimų, įtrūkimų, korozijos radimas elektrai laidžiose medžiagose.	Naudingas ieškant įtrūkimų, kurių neaptinka skverbikliai, tvirtinimo skylėse. Greitas, jautrus, portatyvus.	Labai jautrus junginiams ir pakitimams medžiagoje. Reikalingi skirtingi davikliai priklausomai nuo tiriamo objekto. Tinka tik laidžioms medžiagoms

1.2.3. Magnetinių dalelių metodas

Magnetinių dalelių metodo procedūra gali būti taikoma tik feromagnetinėms medžiagoms (kobaltas, geležis, nikelis ir keli plieno lydiniai). Šis metodas dažniausiai naudojamas paviršiniams įtrūkimams rasti, nors kartais taikomas ir giliau esantiems įtrūkimams. Visgi didėjant pažeidimo gyliui, metodo jautrumas sparčiai mažėja [12].

5 lentelė. Metodo pritaikymas, privalumai ir trūkumai [12]


Metodo pavadinimas	Pritaikymas	Privalumai	Trūkumai
Magnetinių dalelių 	Paviršiuose ar arti jų esančių įtrūkimų radimas feromagnetines savybes turinčiose, bet kokios formos medžiagose.	Paprastas, greitas, portatyvus ir tikslus.	Detalės turi būti nuvalomos ir įmagnetinamos prieš ir išmagnetinamos po metodo. Magnetinis srautas turi kristi tinkamu kampu į defektą. Netinka kompozitams

1.2.4. Rentgeno spindulių metodas

Rentgeno spindulių metodas naudojamas orlaivio dalyse esančių įtrūkimų radimui. Šiuo metodu taip pat galima aptikti koroziją, nuolaužas, atsipalaidavusias detales, užterštus skysčius ir pažeistus ar sugadintus konstrukcijos mazgus. Reikia atsižvelgti į tai, kad atliekant tyrimus, įtrūkimo projekcija turi būti vienoje linijoje su rentgeno aparato spindulių šaltiniu. Naudojant rentgeno spindulių metodą galima tirti metalines ir nemetalines medžiagas.

Daugumoje aviacijoje taikomų tyrimų naudojami rentgeno vamzdžiai, prie kurių prijungtas plonas aliuminio filtras, kad būtų sugeriami mažesnę energiją turintys spinduliai [12].

6 lentelė. Metodo pritaikymas, privalumai ir trūkumai [12]

Metodo pavadinimas	Pritaikymas	Privalumai	Trūkumai
Rentgeno spinduliai 	Vidinių siūlių ir nevienalytiškumų, tokių kaip įtrūkimai ir korozija, radimas.	Gaunamas žmogaus akiai įprastas vaizdas – fotografija, kuri vėliau lengvai išanalizuojama.	Radiacijos pavojus sveikatai. Reikalingi įgudę naudotojai. Reikalingas elektros šaltinis ir specialii


			įranga.
--	--	--	---------

1.2.5. Skverbiklių metodas

Skverbiklių metodas yra palyginti paprastas ir patikimas. Gali būti naudojamas tiriant metalines ir nemetalines konstrukcijas, ieškant pažeidimų, esančių paviršiuje. Galima aptikti koroziją, įtrūkimus įvairias įdubas ir pan. Šio metodo veikimo principas pagrįstas skysčio kapiliarinėmis savybėmis. Apipylius tiriamą vietą specialiu skysčiu ir paskui jį nuvalius nuo paviršiaus, skystis vis tiek lieka pažeidimuose, taip išryškindamas įtrūkimus, koroziją ar kitus defektus.

Skverbikliai klasifikuojami į du tipus: 1) fluorescenciniai dažai 2) matomi dažai. Fluorescenciniams dažams reikalingas specialus apšvietimas [12].

7 lentelė. Metodo pritaikymas, privalumai ir trūkumai [12]

Metodo pavadinimas	Pritaikymas	Privalumai	Trūkumai
Skverbiklių metodas 	Paviršinių įtrūkimų radimas visuose metaluose, liejiniuose, kaliniuose ir kitose įvairiose detalėse.	Paprastas naudoti, tikslus, greitas. Lengva apdoroti rezultatus.	Negalima naudoti kompozitinėms medžiagoms.

1.2.6. Ultragarso metodas

Šio metodo veikimo principas paremtas ultragarso bangų atspindžiu. Ultragarso bangos sklinda tam tikru greičiu priklausomai nuo sklidimo terpės. Akustinio impedanso pasikeitimas medžiagoje sukelia ultragarso greičio pasikeitimą, taip sudarydamas aidą. Atstumas iki akustinio impedanso pasikeitimo (įtrūkimo, oro tarpo, atsisluoksniavimo) nustatomas, jeigu yra žinomas ultragarso greitis tiriamo objekto medžiagoje ir laikas, per kurį ultragarso bangos pasiekia akustinio impedanso pasikeitimą ir grįžta atspindėję nuo jo.


Bet koks akustinio impedanso pasikeitimas sukeltas įtrūkimo, kitos medžiagos ir pan., atspindi ultragarso bangas aido forma į pjezoelektrinį kristalą, esantį detektoriuje. Pjezoelektrinis kristalas turi dvi funkcijas:

1. Paversti elektrinę energiją į mechaninę (ultragarso bangas);
2. Grįžtančią mechaninę energiją (aidą) paversti atgal į elektrinius signalus, kad būtų atlikta duomenų analizė.

Detektorius veikia kaip imtuvas atspindėtai energijai priimti tarp siunčiamų impulsų.

Ultragarsinių impulsų generatorius veikia keliais principais. Tiriant objektą svarbu tinkamai pasirinkti dažnį, kuris priklauso nuo ultragarso sklidimo skvarbos ir jautrumo. Aukštas dažnis naudojamas jautrumui, o žemas dažnis – skverbimosi gilumui [12].

8 lentelė. Metodo pritaikymas, privalumai ir trūkumai [12]

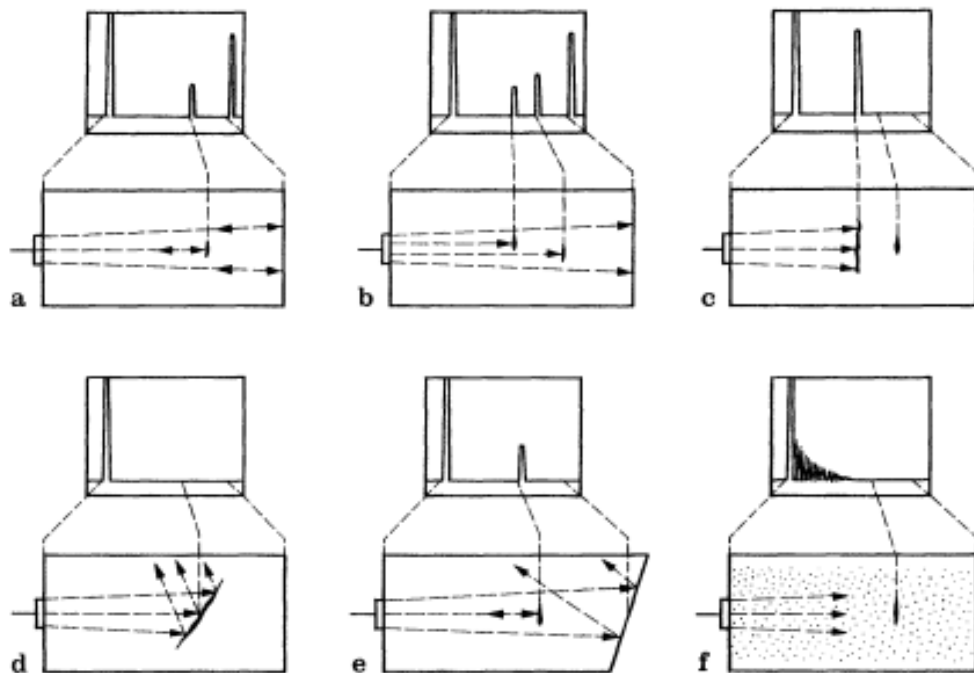
Metodo pavadinimas	Pritaikymas	Privalumai	Trūkumai
Ultragaras 	Paviršinių ir giluminių defektų, įtrūkimų ir įplyšimų radimas daugelyje metalų ir kompozitų naudojantis impulsų aido technika.	Greitas, patikimas, lengva dirbti. Rezultatai matomi iškart. Labai tikslus, portatyvus, aukštas jautrumas. Tinka kompozitams	Reikalingas įgudęs operatorius. Turi būti žinoma defektų plokštuma, kad būtų pasirinktos tinkamos bangos.

Tiriant kompozitus ultragarso metodu svarbu įvertinti tai, kad kompozitai gaminami iš skirtingų medžiagų, kurios turi ir skirtingas tiek mechanines tiek chemines savybes, dėl kurių keičiasi ultragarso parametrai matuojant.

1.3. Impulsinis aido metodas

Tokie kompozitai kaip anglies pluoštu armuotas plastikas (CFRP), aviacijoje naudojami labai dažnai dėl savo stiprumo ir standumo savybių. Visgi poringumas didesnis kaip 2.5 % gali gerokai sumažinti gaminio stiprumą, todėl būtina užtikrinti gaminio gamybos kontrolę [14]. Tai galima padaryti naudojant ultragarso metodą.

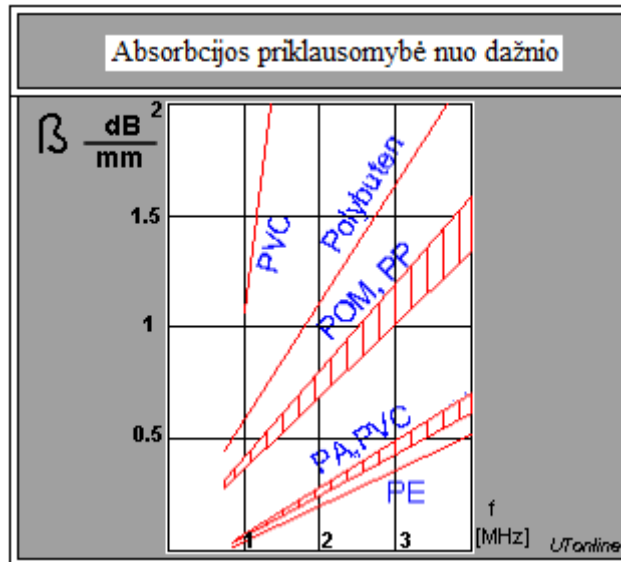
Iš daugelio skirtingų ultragarso metodų, impulsinis aido metodas paplitęs labiausiai. Impulsinis aido metodas veikia atspindėtų bangų principu. Ultragaras turi pastovų greitį, priklausomai nuo aplinkos, kurioje jis sklinda. Bet koks akustinio impedanso (struktūros pažeidimo) medžiagoje pasikeitimas sukelia ultragarso greičio pasikeitimą tame taške, kuriame akustinis impedansas skiriasi. Dėl ultragarso greičio pasikeitimo atsiranda aidas. Atstumas iki akustinio impedanso gali būti nustatytas jeigu yra žinomas ultragarso greitis tiriamoje medžiagoje ir laikas per kurį ultragarso banga pasiekia pažeidimą ir grįžta atgal. 4 pav. pavaizduoti skirtingi A tipo vaizdai, gaunami tiriant bandinį impulsiniu aido metodu [12].



5 pav. A tipo vaizdai gaunami impulsinio aido metodu priklausomai nuo pažeidimo (a - mažas pažeidimas ultragarso spindulyje, b - du maži pažeidimai ultragarso spindulyje, c - didelis pažeidimas, kuris uždengia mažą pažeidimą ir objekto dugną, d - didelis įstrižas pažeidimas, kuris uždengia objekto dugną, e - mažas pažeidimas, tačiau aidas neatsispindi nuo objekto dugno, nes dugnas įstrižas, f - didelis ultragarso slopinimas, dėl medžiagos nevientisumo, ultragaras nepasiekia nei pažeidimo nei objekto dugno) [11]

Kaip minėta 1.2.6 skyrelyje, ultragarso tyrimo būdu rezultatai gali būti pateikti skirtingo tipo vaizdais. C tipo vaizde matome 3D objekto modelį, visgi dėl to, kad poros yra labai mažos ir jų kiekis didelis, jas pamatyti yra gana sudėtinga. Dėl šios priežasties ieškoma ne kiekvienos poros atskirai, bet tiriamas ultragarso signalo slopinimas medžiagoje.

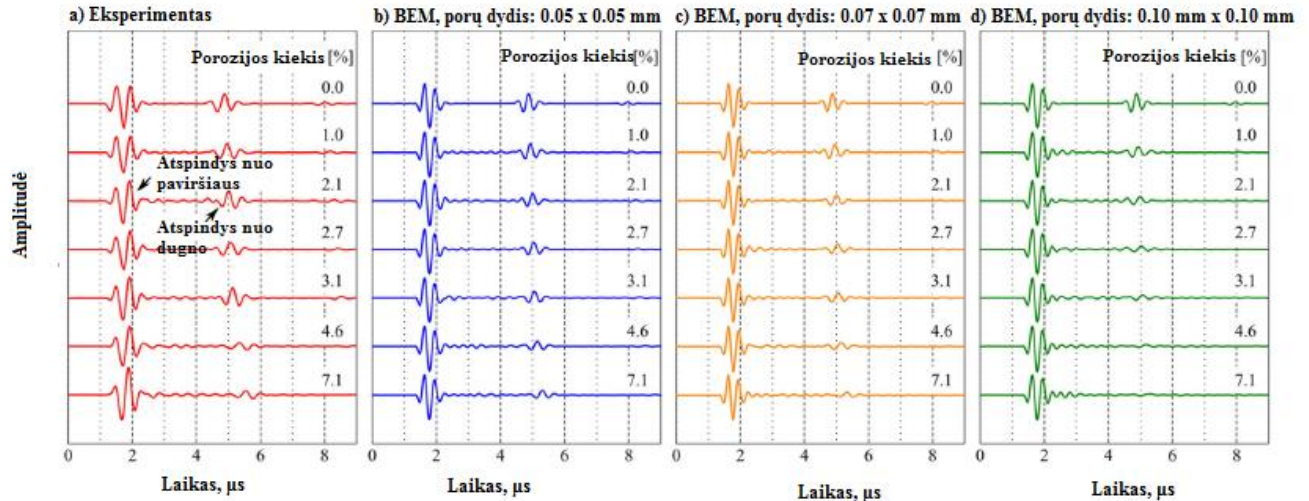
Slopinimas apibūdinamas akustinės energijos praradimu tarp bet kurių dviejų taškų, esančių ultragarso sklaidimo kelyje. Šis praradimas gali būti sukeltas absorbcijos, garso sklaidos, medžiagos savybių arba defektų, esančių medžiagoje. Ultragarso slopinimas didėja didėjant ultragarso dažniui. Jeigu signalo slopinimas vyksta tik dėl absorbcijos, tuomet dažnio ir slopinimo priklausomybė yra kvadratinė. Jeigu signalas slopsta dėl sklaidos, tuomet priklausomybė yra aukštesnės eilės eksponentinė [22].



6 pav. Slopinimas tam tikruose plastikuose [22]

6 pav. pateikta signalo absorbcijos priklausomybė nuo dažnio tam tikruose plastikuose.

Ultragarso signalas slopinamas priklausomai nuo porų kiekio gaminyje, kuris matuojamas procentais. 7 pav. matyti kaip slopsta signalas didėjant poringumui gaminyje. Labai svarbu paminėti, kad, esant dideliame gaminio poringumui, signalas nuo dugno kartais net nėra gaunamas. Visa signalo energija nuslopsta ir yra išsklaidoma bandinyje [1].



7 pav a) Eksperimentu gauti signalo rezultatai b)-d) baigtinių elementų metodu gauti signalo rezultatai [1]

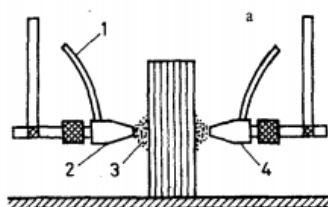
Atliekant matavimus ultragarso slopinimas medžiagoje išmatuojamas ultragarso bangos amplitude. Praleidus ultragarso signalą per tiriamą objektą lyginamos išėjimo ir sugrįžusios (atsispindėjusios) amplitudės signalai (decibelais) [18].

Ultragarso signalo slopinimas kompozituose yra gana didelis dėl to, kad signalas išsklaidomas dėl skirtingų medžiagų pluoštų išsidėstymo ir izoterminės absorbcijos. Dažniausiai naudojami ultragarso keitiklių dažniai poringumui kompozituose tirti kinta nuo 2.25 MHz iki 10 MHz [18].

Impulsinis aido metodas turi privalumą, kai priėjimas prie tiriamo objekto galimas tik iš vienos pusės. Taip pat impulsinis aido metodas patogus tuo, kad juo galima tirti naudojant skirtingus bangų sklaidimo būdus: išilginės bangos, skersinės ir paviršinės bangos [12]. Šiam metodui nereikalinga sudėtinga įranga, nereikia tiriamo objekto panardinti į vandenį, galima aptikti įvairaus dydžio formos ir įvairiame gylyje esančius defektus.

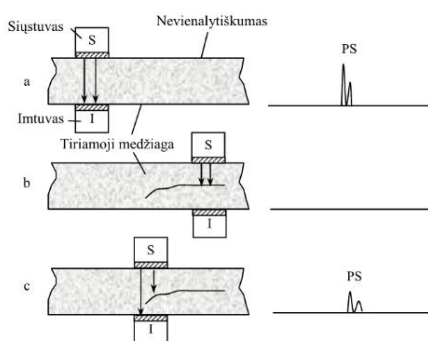
1.4. Perdavimo metodas

Perdavimo metodas naudojamas kai tiriamąjį bandinį galima pasiekti iš abiejų pusių. Vienoje pusėje tvirtinamas keitiklis, kuris veikia kaip signalo siųstuvas, o kitoje pusėje - keitiklis, kuris veikia kaip imtuvas. 5 pav. pavaizduota perdavimo metodo veikimo schema.



8 pav. Perdavimo metodo schema 1 – vandens žarnelė, 2 – keitiklis, kuris veikia kaip siųstuvas, 3 – vandens čiurkšlė 4 - keitiklis, kuris veikia kaip imtuvas [18]

9 pav. pavaizduoti A tipo vaizdai, gaunami priklausomai nuo skirtingo defekto.



9 pav. A tipo vaizdai, gaunami perdavimo metodu [6]

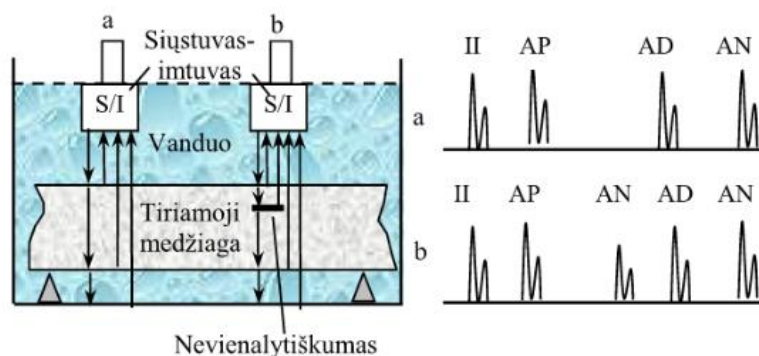
Metodas puikiai tinka aptikti daugumą defektų, taip pat medžiagos storiui ir ultragarso greičiui medžiagoje matuoti ir medžiagos sudėties pokyčiams tirti [6].

Vienas iš didžiausių metodo trūkumų yra tas, jog keitikliai turi būti pozicijuojami tiksliai vienas priešais kitą. Taip pat keitikliai turi turėti vienodas charakteristikas, tiriamo objekto paviršius

privalo būti plokščias ir lygiagretus. Naudojant šį metodą negalima nustatyti defekto gylio, tik skersines koordinates [6].

1.5. Imersinis metodas

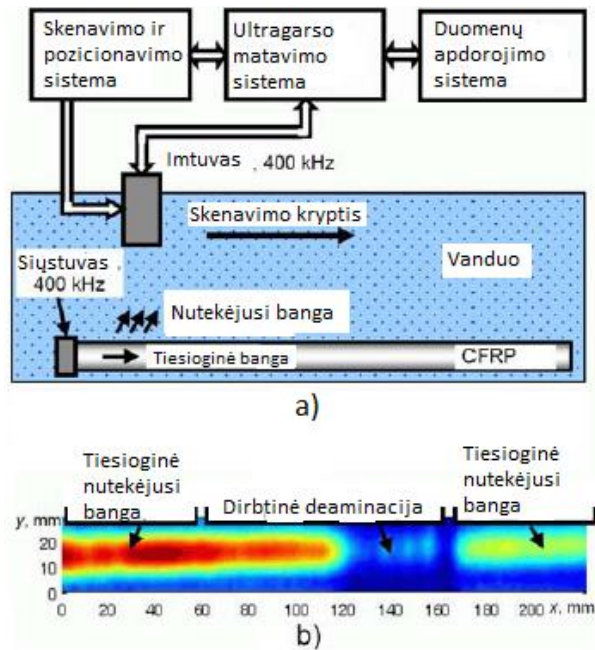
Šio metodo principas nuo anksčiau aptartų skiriasi tuo, kad tiriamas objektas panardinamas į vandenį. Imersinio metodo privalumai yra tie, kad vanduo sukuria vėlinimo liniją, todėl galima atskirti signalus. Taip pat šis metodas leidžia tirti įvairios geometrinės formos objektus ir vandenyje gaunamas didesnis matavimo greitis. 10 pav. pavaizduota imersinio metodo matavimo schema. Statmenas keitiklis veikia kaip siųstuvas ir imtuvas. Dešinėje paveikslo pusėje matyti gaunamas signalas [6].



10 pav Imersinio metodo schema [6]

Kauno technologijos universitete Ultragarso institute mokslininkai R. Kažys, et al atliko CFRP strypelių tyrimą matuodami per oro tarpą (1.6 skyrius) ir imersiniu būdu. CFRP strypeliuose buvo dirbtinai sukurta delaminacija tam tikroje vietoje. CFRP strypelis buvo panardintas į vandenį ir ištirtas ultragarsu. 11 pav. matyti eksperimento schema ir gauti rezultatai.

Matome nutekėjusią bangą vandenyje, kuri susidaro dėl bangų daugėjimo sklindant išilgai CFRP strypelio. Ten kur strypelis sugadintas, nutekėjusios bangos visiškai nuslopintos [7].



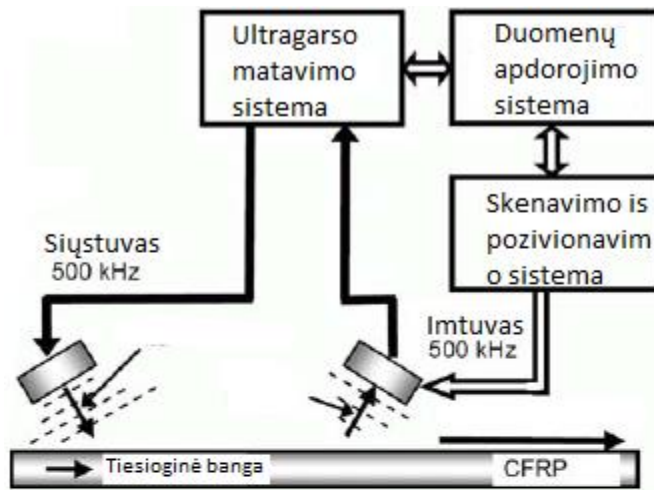
11 pav. CFRP strypelių inspekcija matuojant imersiniu būdu: a) eksperimento schema, b) C tipo vaizdas [7]

Kaip matome, imersiniu būdu galima puikiai aptikti pažeidimus, esančius CFRP kompozite, tačiau tam reikalinga sudėtinga įranga ir objektas turi būti panardintas į vandenį. Šis metodas netinkamas, kai tiriamas objektas panardintas į vandenį gali „prisisiurbti“ vandens ir dėl to pakeisti savo savybes [6,7].

1.6. Matavimai per oro tarpą

Matavimas per oro tarpą yra bekontaktis ultragarso tyrimo būdas. Vienas iš šio metodo privalumų yra tas, kad tyrimo įranga ir tiriamas objektas nekontaktuoja ir todėl bandinys nėra užteršiamas. Bekontaktis tyrimo būdas yra gana patrauklus atlikti gamybinėmis sąlygomis. Taip pat svarbu paminėti tai, kad matavimas per oro tarpą yra tinkamas atlikti tada, kai reikia gauti rezultatus greitai ir nėra galimybės naudoti specialios įrangos [8, 16, 6].

12 pav. pavaizduota matavimo per oro tarpą įrangos struktūrinė schema ir įrangos nuotrauka. Kaip minėta 1.5 skyrelyje eksperimentas buvo atliktas Kauno technologijos universiteto Ultragarso tyrimo institute. Buvo iširta CFRP strypelio delaminacija matuojant per oro tarpą.



a)



b)

12 pav. Ultragarsinis matavimas per oro tarpą: a) struktūrinė schema, b) eksperimento įrangos nuotrauka [7]

Taip pat matavimai per oro tarpą leidžia atvaizduoti tiriamo objekto paviršius matuojant atspindėtus ultragarso signalus. Iš signalo amplitudės galima nustatyti objekto topografiją, nes zonos, kurios yra statmenos ultragarso spinduliui, stipriai atspindi signalą, o tos zonos, kurios nėra statmenos, signalo beveik neatspindi [17].

Visgi renkantis matavimus per oro tarpą labai svarbu įvertinti keletą kriterijų. Tarp oro ir kieto paviršiaus gaunamas didžiulis signalo impedanso neatitikimas, kuris sukuria ultragarso energijos perdavimo problemas. Pavyzdžiui impedanso santykis tarp anglies pluoštu armuoto plastiko ir vandens yra 3 su 1 kai tuo tarpu santykis tarp CFRP ir oro yra 10000 su 1. Naudojant 1.6.1 ir 1.6.2 atspindžio ir perdavimo formules buvo apskaičiuota, kad 99.96 % energijos atsispindi oro ir CFRP sandūroje. [12]

$$\alpha_r = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad 1.6.1$$

$$\alpha_t = \frac{4Z_2 Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad 1.6.2$$

α_r – atspindžio koeficientas; α_t - perdavimo koeficientas; Z_1 ir Z_2 impedansai medžiagose.

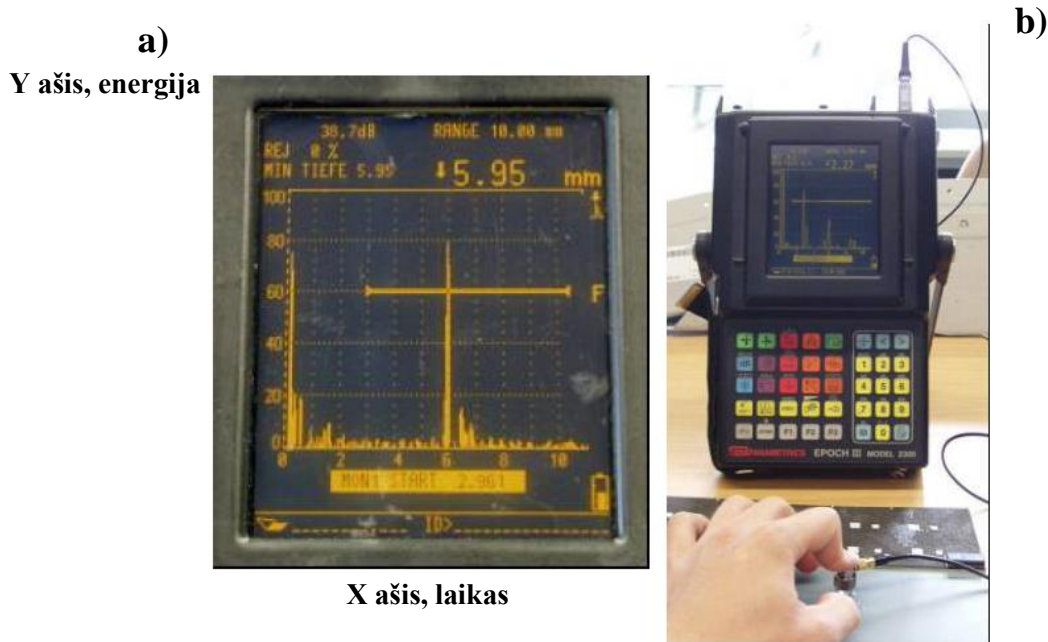
Nors ir dėl tokių pažangių keitiklių kaip pjezokeraminiai ir “Gas Matrix Piezoelectric” (GMP) išvystymo, signalo impedanso tarp paviršių neatitikimas sumažinamas iki tinkamo naudojimui,

matavimai per oro tarpą šiuo atveju netinkami. Impulsinis aido metodas yra tinkamesnis ir paprastesnis kai reikia tirti poringumą.

1.7. Keitiklių gardelės

Keitiklių gardelės yra daug kartu sujungtų ir kartu veikiančių keitiklių darinys. Todėl norint suprasti kaip veikia keitiklių gardelės, labai svarbu žinoti pagrindinius vieno keitiklio veikimo principus.

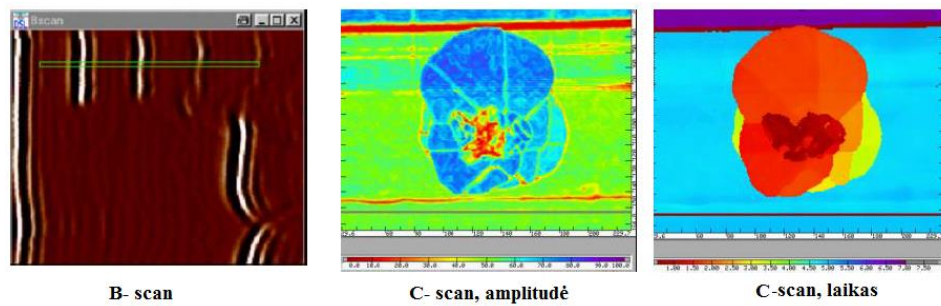
Paprastame viename keitiklyje elektrinis signalas sužadina pjezo kristalą. To rezultatas - mechaninė vibracija, kuri sukelia ultragarso bangą. Garso greitis ore yra 331,2 m/s, o CFRP kompozite apie 3000 m/s. Dideli ultragarso impedanso pasikeitimai sukelia didelius ultragarso energijos nuostolius, todėl pjezo kristalo išspinduliuota ultragarso banga, praeinanti pro oro ir CFRP sandūrą, netenka didžiulio kiekio energijos (apie tai jau kalbėta 1.6 skyrelyje). Ultragarso energijos praradimas yra vienas iš didžiausių ultragarso trūkumų. Norint sumažinti energijos nuostolius, naudojamas kontaktinis skystis, pvz.: vanduo, kuriame ultragarso greitis yra 1483 m/s. Kai ultragarso spindulys pasiekia bandinio dugną, jis atsispindi ir grįžta atgal. Grįžusio spindulio dydis priklauso nuo ultragarso greičių pasikeitimo. Atliekant matavimus yra svarbūs du parametrai: laikas, per kurį spindulys nukeliavo iki dugno ar pažeidimo ir grįžo atgal ir signalo amplitudė. [27].



13 pav. a) A tipo vaizdas b) matavimo įranga ir keitiklis [21]

13 pav. pavaizduoti parametrai gaunami vienu keitikliu ir vadinami A tipo vaizdais. Jeigu keitiklis juda išilgai skenavimo linijos, tuomet gauname daug A tipo vaizdų išilgai vienos ašies. Toks vaizdas vadinamas B tipo vaizdu (14 pav.). Jeigu keitiklis skenuojamas ir antroje ašyje tuomet

gauname paviršiaus skenavimo rezultatus ir toks vaizdas vadinamas C tipo vaizdu. C tipo vaizdas gali būti gaunamas priklausomai nuo signalo laiko arba amplitudės. (14 pav.).



14 pav. Pavyzdys su įlenkimo pažeidimu [21]

Atliekant matavimus vienu keitikliu visas procesas užima daug laiko ypač kai pažeidimai yra gana dideli, todėl kaip alternatyva naudojamos keitiklių gardelės.

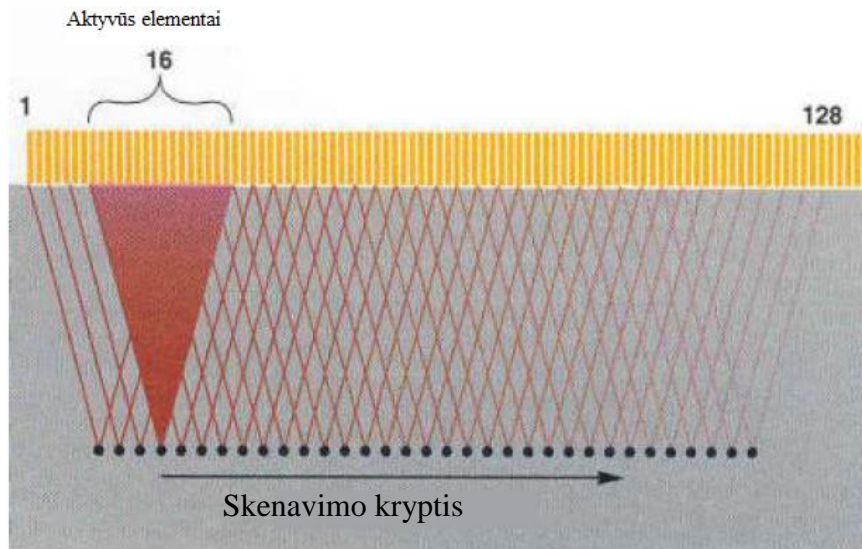
Keitiklių gardelės yra keitiklis, sudarytas iš daug atskirų pjezoelektrinių elementų, kurie sujungti taip, kad siunčiami ir gaunami signalai galėtų būti analizuojami tiek kartu tiek atskirai [10,21].



15 pav. keitiklių gardelės [21]

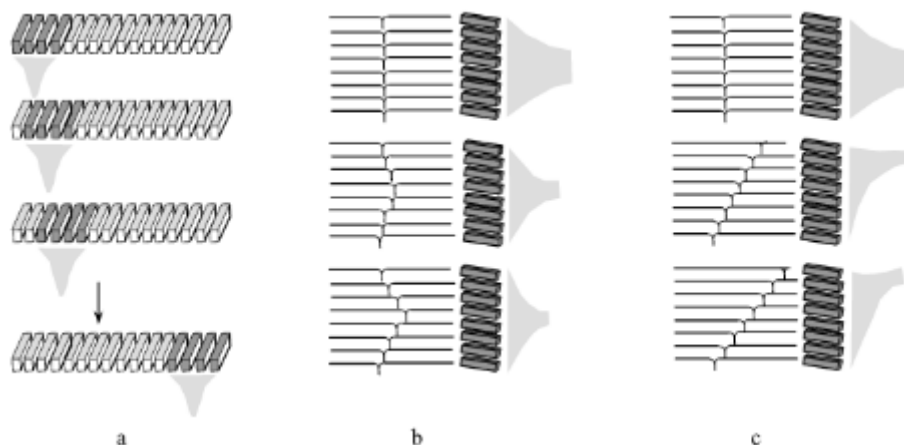
Naudojant keitiklių gardelę, atliekamas elektroninis skenavimas pasirenkant tam tikrą aktyvių elementų skaičių, kurie suaktyvinami vienas paskui kitą išilgai skenavimo krypties [10,21].

16 pav. matyti 128 elementų gardelė su 16 aktyvių elementų, kurių signalas fokusuojamas viename taške.



16 pav. Keitiklių gardelės signalo fokusavimas [21]

Keitiklių gardelėje pjezoelektrinius elementus galima sužadinti visus kartu, atskiras grupes arba tam tikra seka. Žadinant tam tikra seka, ultragarsinis laukas gali būti sufokusuojamas tam tikrame gylyje ar vietoje, pasukamas arba tiesiog atliekamas skenavimas. [10]



17 Pav. Elektroninis gardelių spindulio valdymas a) linijinis skenavimas b) fokusavimas c) pasukimas [10]

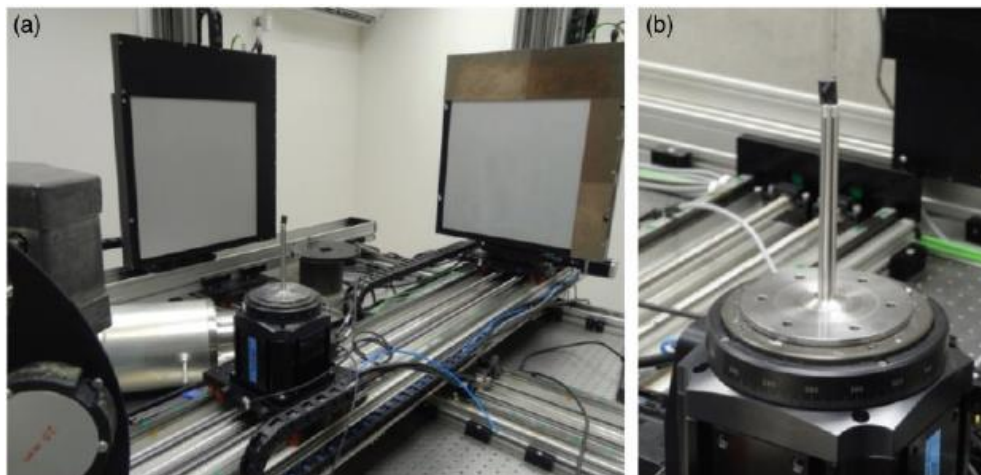
17 pav. pavaizduotas elektroninis gardelių spindulio valdymas. Keitiklių gardelės turi daug privalumų lyginant su paprastu keitikliu. Naudojant gardeles dažniausiai nereikia mechaninio skenavimo, todėl sutaupoma laiko. Atliekant matavimus iš karto gaunamas tiriamo bandinio vaizdas, kuris yra paprastas ir lengvai suprantamas.

1.8. Kompiuterinė tomografija

Gaminio kokybei įvertinti svarbu atlikti kuo detalesnę analizę. Anksčiau minėtais ultragarso metodais gaunami duomenys nusako tik apytikrius rezultatus arba gaunamas tik vieno skerspjūvio vaizdas ir negaunama daug informacijos apie gaminio morfologiją. Taip pat negalima nustatyti, ar

poringumas išsidėsto tam tikra homogenine seka, ar tam tikra kryptine struktūra. Tai turi didelę įtaką renkantis tarp analizės metodų poringumui tirti [20].

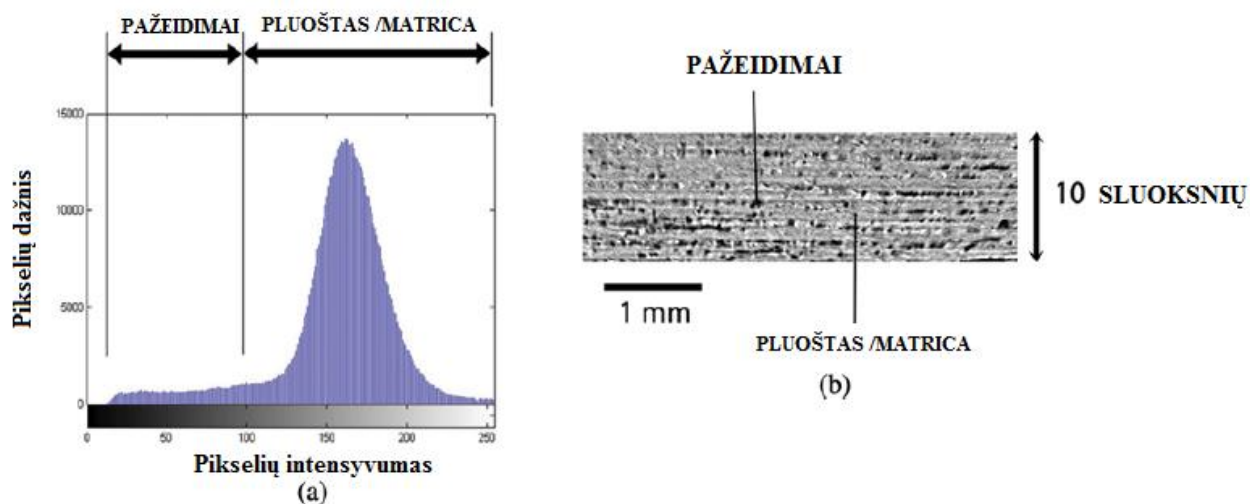
Aukštos raiškos rentgeno spindulių kompiuterinė tomografija yra vienas iš geriausių būdų atlikti kompozitinio gaminio analizę. Šio metodo veikimo principas yra aukšto krūvio rentgeno dalelių skverbimasis į bandinį iš įvairių kampų taip sukuriant 3D mikrostruktūros vaizdą [20].



18 pav. a) Rentgeno spindulių aparatas b) bandinio vaizdas ant stalelio [19]

Kaip matyti 18 pav. rentgeno spindulių aparatas užima daug vietos, ji nėra portatyvus ir tyrimas turi būti atliekamas laboratorijoje.

Atliekant poringumo tyrimą labai svarbu paminėti tai, kad dažniausiai atsižvelgiama į porų kiekį procentais tiriamame bandinyje. Kompiuterinės tomografijos metodu galima nustatyti, kokią dalį oro tarpeliai (poros) užima lyginant su viso bandinio tūriu.



19 Pav. Poringumo tyrimo metodas a) juodų pikselių santykis lyginant su visais vaizdo pikseliais b) Kompiuterinės tomografijos būdu gautas vaizdas [20]

Tai atliekama analizuojant vaizdus, gautus kompiuterine tomografija. 19 pav. b) matyti juodi taškėliai (piksėliai) pilkame fone. Juodi taškėliai yra pažeidimai. Naudojant tam tikras programas galima apskaičiuoti kokį kiekį sudaro juodi piksėliai lyginant su visais piksėliais. Tokiu būdu apskaičiuojamas poringumo kiekis gaminyje ir taip pat gaunamas 3D detalus vaizdas [19,20].

Visgi, rentgeno spindulių kompiuterinės tomografijos metodas galimas tik specialiose laboratorijose naudojant specialią įrangą. Bandinys turi būti išardomas iš jo konstrukcijos. Norint gauti rezultatus dažniausiai skaičiavimai užima daug laiko, todėl kompiuterinės tomografijos metodas netinka atlikti gamybinėmis sąlygomis [20]

1.9. Apibendrinimas ir tinkamiausio metodo pasirinkimas

Iš apžvelgtų neardomosios kontrolės metodų kompozitams tinkami ultragarsas ir rentgeno spindulių metodai. Ultragarsas laikomas pagrindiniu neardomosios kontrolės metodu poringumui aptikti aviaciniuose kompozituose dėl savo portatyvumo, paprastumo ir gaunamų tikslių rezultatų [23]. Visgi kompiuterine tomografija gaunami netgi tikslesni rezultatai, tačiau darbo tikslas yra atlikti tyrimą gamybinėmis sąlygomis, todėl rentgeno metodas atmetamas.

Siekiant atlikti tyrimą kuo paprasčiau ir gauti kuo geresnius rezultatus, perdavimo, imersinis metodai ir matavimas per oro tarpą atmetami dėl sudėtingesnės įrangos ir sunkiau gaunamų rezultatų. Naudojant keitiklių gardeles nereikia turėti priėjimo prie bandinio iš abiejų pusių, nereikia nardinti bandinio į vandenį, taip pat aparatūra yra lengva, portatyvi, rezultatai gaunami iškart, yra vaizdūs ir lengvai analizuojami. Todėl iš aprašytų ultragarso metodų tinkamiausias yra matavimas naudojant keitiklių gardeles.

Taip pat, išanalizavus literatūrą, nustatyta, kad tyrime bus labai svarbu atsižvelgti į poringumo sukėliamus ultragarso signalo pasikeitimus. Kaip jau minėta 1.6 skyrelyje, didelis porozijos kiekis nuslopina ultragarso signalą ir atspindys nuo dugno kartais net nėra gaunamas, todėl rezultatus analizuoti sunkiau [15].

Pagal išanalizuotą literatūrą bus atliekamas kompiuterinis modeliavimas. Nustatyta, kad poringumui kompozituose tirti dažniausiai naudojami ultragarso keitiklių dažniai yra nuo 2.25 MHz iki 10 MHz [18]. Kuo didesnis keitiklio dažnis, tuo didesnis skiriamumas, tačiau dėl didesnio dažnio taip pat didėja ir signalo slopinimas, todėl modeliuojant bus renkamosi 3,5 MHz ir 5 MHz keitikliai ir gardelės taip siekiant išgauti gerą skiriamumą ir išvengti didelio signalo slopinimo.

2. Kompiuterinis modeliavimas

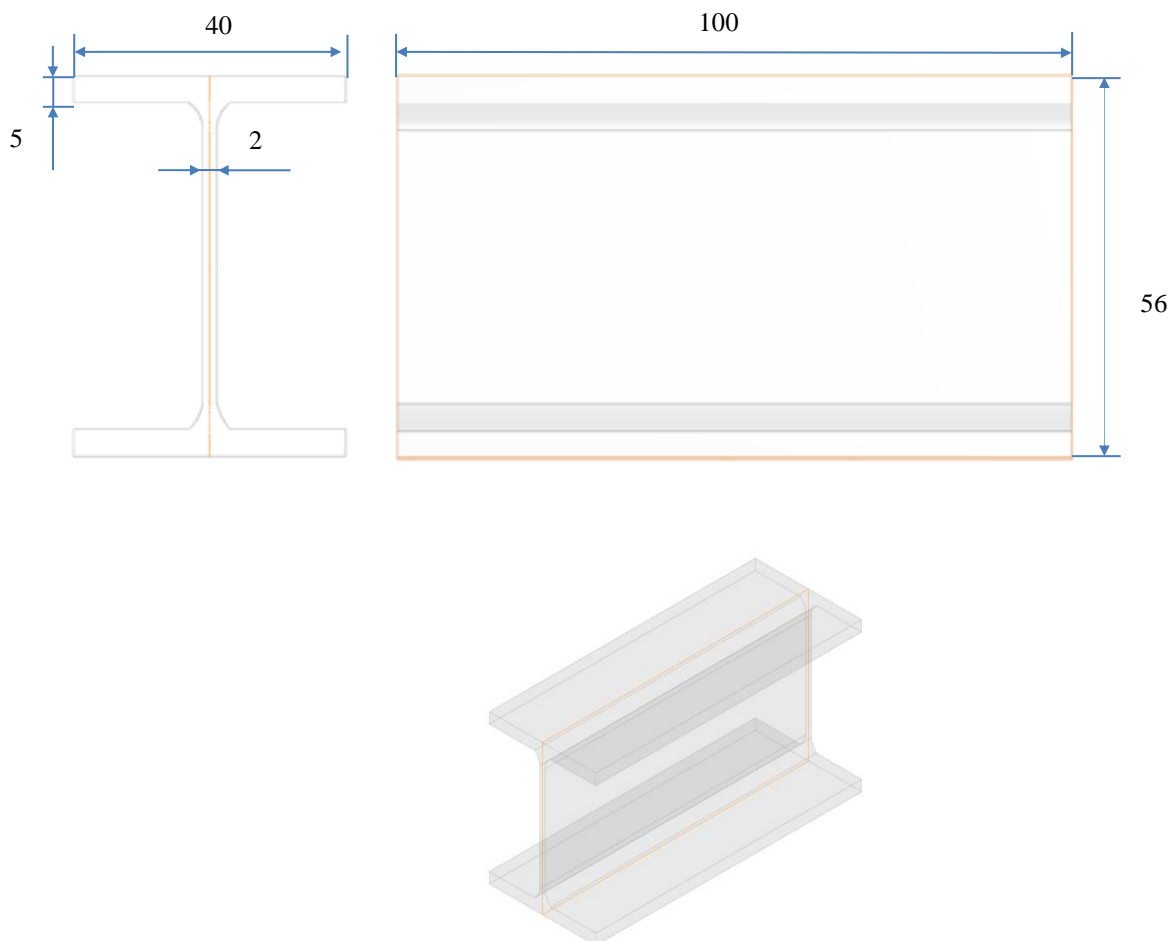
Šios darbo dalies tikslas yra sukurti kompiuterinį modelį. Atsižvelgiant į modelio rezultatus bus pasirenkamas tinkamiausias realus matavimo būdas.

Siekiant parinkti tinkamiausią defektų nustatymo būdą sudėtingos geometrijos lonžerone pagamintame iš anglies pluoštu armuoto plastiko, bei parinkti tinkamiausius šio tyrimo parametrus sukurtas kompiuterinis modelis CIVA aplinkoje.

Programos CIVA pagalba galima atlikti visą tyrimo simuliaciją, t.y. sukurti bandinio CAD modelį, pasirinkti bandinio medžiagą, ultragarso keitiklį, jo dažnį, atlikti rezultatų palyginimą ir taip nustatyti labiausiai tinkančius parametrus. [9]

2.1. Tiriamo objekto bandinio modelio kūrimas CIVA aplinkoje

Realus bandinys, kuris pavaizduotas 1 pav. yra pagamintas iš 3 anglies pluošto (CFRP) sluoksnių. Bandinio CAD modelis suprojektuotas CIVA aplinkoje pateiktas 20 pav. Matmenys pateikti mm.

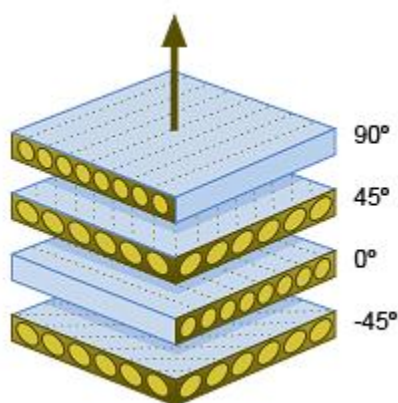


20 pav. Modelio vaizdai su matmenimis

Projektuojant modelį pasirenkami 3 kompozito sluoksniai, kurie išdėstyti nesimetriškai, bet subalansuoti. Lentelėje pateikiami modelio parametrai. Mechaninių parametų atžvilgiu toks modelis turėtų išlikti plokštumoje, nes yra nesimetriškas, tačiau jį tempiant neatsiras šlyties deformacijų. 5 pav. pavaizduotas kompozito sluoksnių išsidėstymas.

9 lentelė. Sluoksnių išsidėstymas

Pavadinimas	Sluoksnių kryptis
Sluoksnis n° 0	90°
Sluoksnis n° 1	45°
Sluoksnis n° 2	0°



21 pav. Sluoksniuotas homogeninis kompozitas

Šiuo atveju pasirenkamas medžiagos tankis 1494 kg/m^3 . Priimama, kad simetrija – homogeninė ortotropinė [24]. 10 lentelėje pateikiam standumo matrica.

10 lentelė. Standumo matrica (GPa) – tamprumo savybės

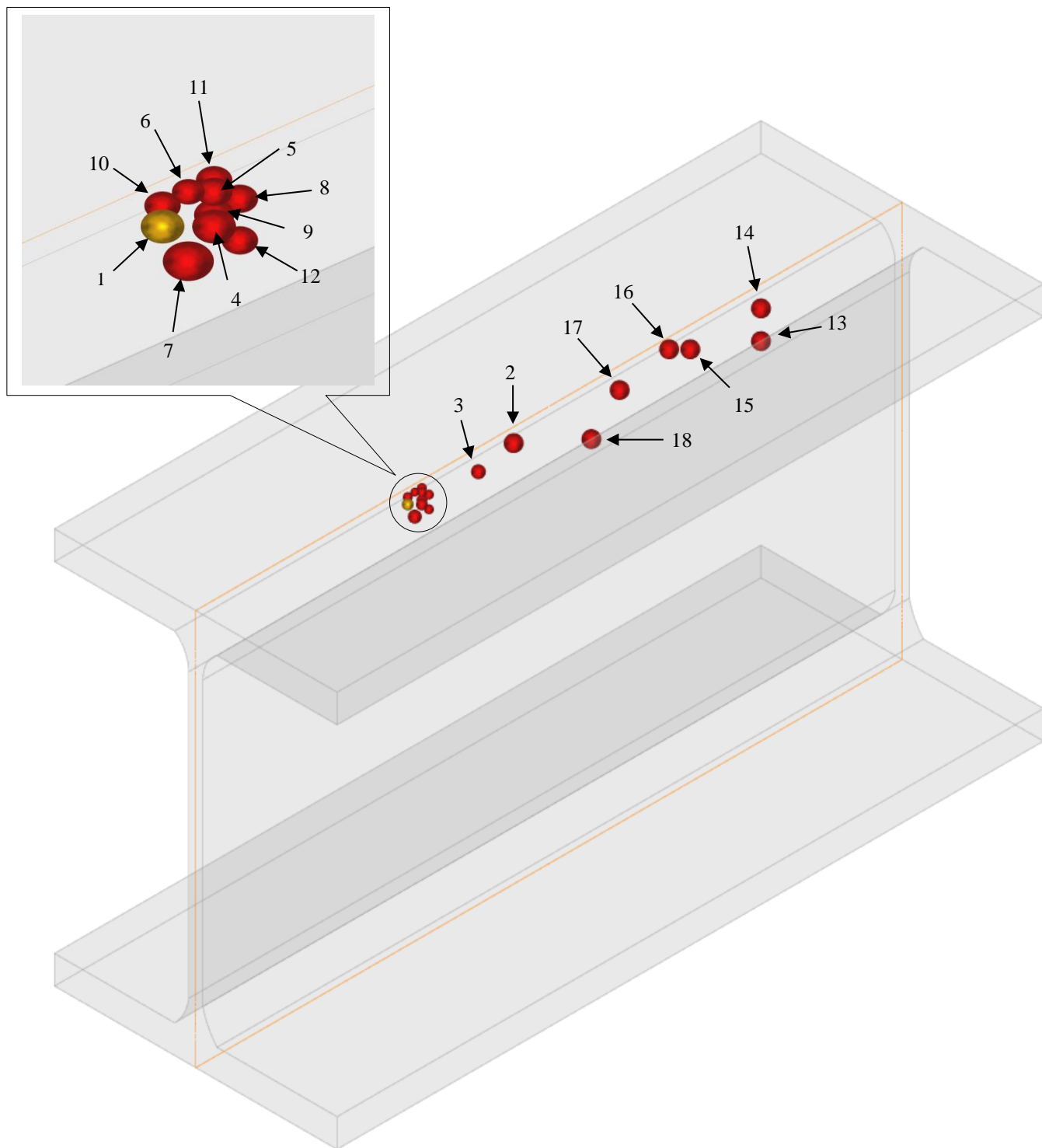
68.529	86.175	6.093	0	0	0
86.175	116.359	5.236	0	0	0
6.093	5.236	12.568	0	0	0
0	0	0	4.33	0	0
0	0	0	0	3.595	0
0	0	0	0	0	25.742

Pasirinkus pagrindinius modelio parametrus, suprojektuojami defektai, kurie atitiktų realioje konstrukcijoje atsirandančius defektus. Taip pat suprojektuojami defektai, kuriuos tiriant būtų galima nustatyti pagrindinius ultragarso matavimo ypatumus ir suprasti kaip veikia tam tikras ultragarsinis metodas ir metode naudojami keitikliai. Įvairaus dydžio ir skirtingose vietose esantys defektai leis suprasti, kokius defektus bus galima atrasti realaus eksperimento metu ir kokius keitikius bei įrangą bus geriausia naudoti. 11 lentelėje pateikiamas visas defektų sąrašas, jų koordinatės, atstumas nuo paviršiaus ir defekto spindulys.

11 lentelė. Defektų koordinatės, atstumai nuo paviršiaus ir spinduliai

Defekto Nr.	Koordinatės, mm			Atstumas nuo paviršiaus, mm	Spindulys, mm
	x	y	z		
1	20	70	-2	2	0,6
2	20	55	-2	2	1
3	20	60	-1	3	0,75
4	21	69	-2	2	0,6
5	20	68	-2,5	1,5	0,5
6	20	69	-3	1	0,45
7	21	70	-1	3	0,7
8	20	67	-1,7	2,3	0,5
9	20	68	-1,5	2,5	0,55
10	19	69	-1,9	2,1	0,5
11	19	67	-2	2	0,5
12	21	68	-0,9	3,1	0,5
13	20	20	3	7	1
14	20	20	-1	3	1
15	20	30	-1	3	1
16	20	33	-2,5	1,5	1
17	20	40	-1	3	1
18	20	44	3	7	1

Realioje konstrukcijoje dažniausiai poros būna apskritimo ar bent jau panašios į apskritimą formos, todėl modeliuojant visi defektai yra apskritimai.



21 pav. Defektų išsidėstymas modelyje

21 paveiksle pavaizduotas modelis su suprojektuotais defektais. Kiekvienas defektas turi priskirtą numerį, kuris nesikeis viso tyrimo metu.

2.2. Ultragarso keitiklio laukas

Labai svarbus ultragarso keitiklio parametras yra jo spinduliuojamas akustinis laukas. Keitiklis generuodamas ultragarso bangą sklaidžia ją ne iš vieno taško, bet iš daugelio keitiklio

paviršiuje greta vienas kito esančių taškų. Išspinduliuotos bangos erdvėje tarpusavyje sąveikauja. Tam tikrame erdvės taške, kuris vadinamas tolimu lauku, akustinio slėgio amplitudė pasieks maksimumą ir bus lygi visų pavienių bangų amplitudžių sumai.

Ultragarsinio keitiklio akustiniame lauke galima išskirti du pagrindinius laukus:

- Artimas laukas
- Tolimas laukas

Artimas laukas yra erdvė netoli keitiklio paviršiaus. Artimame lauke vyksta gana stiprūs ultragarso bangų netolygumai ir svyravimai. Šis laukas išsidėstęs tarp keitiklio paviršiaus ir lauko amplitudės ir paskutinio ir didžiausio maksimumo vietos. Artimo lauko ilgis N priklauso nuo šių parametrų:

D - keitiklio skersmuo; λ – ultragarso bangos ilgis tiriamoje aplinkoje; f – bangos dažnis; V – ultragarso greitis.

Artimam laukui apskaičiuoti naudojama formulė 1 [10]

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 f}{4V} \quad 2.2.1$$

Žinant keitiklio ir ultragarso parametrus medžiagoje teoriškai apskaičiuojamas artimas laukas.

$D - 10 \text{ mm};$

$f - 5 \text{ MHz};$

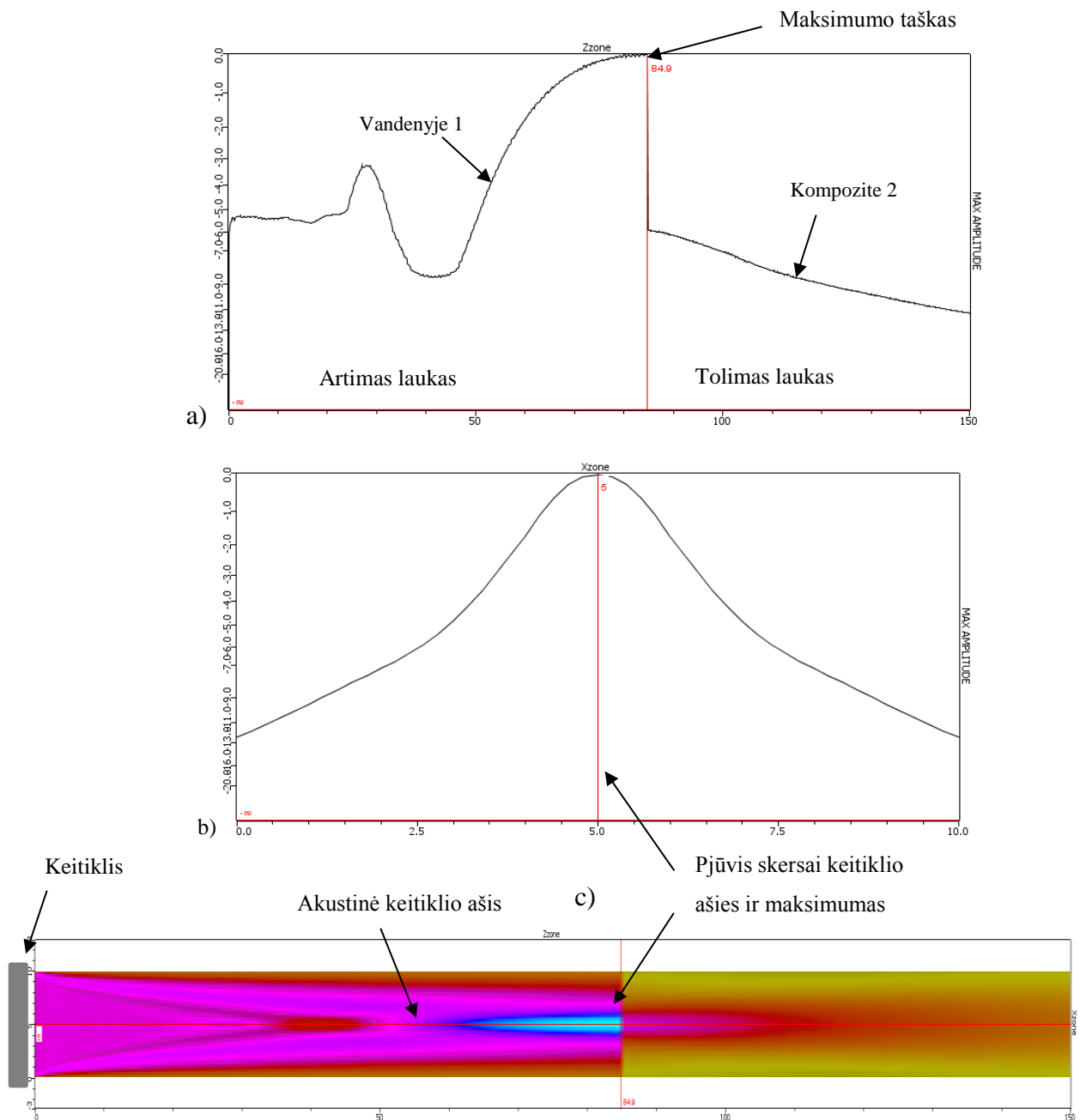
$V - 1483 \text{ m/s}.$

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 f}{4V} = 0.0842 \text{ m} = 84,2 \text{ mm}$$

Artimame lauke rasti defektus ir tiksliai įvertinti jų dydį yra labai sudėtinga dėl ultragarso slėgio svyravimų, todėl defektų paieška turėtų būti vykdoma tolimame lauke. Tolimojo lauko zona vadinama tolimąja jeigu ji nuo keitiklio nutolusi atstumu N . Tolimajame lauke keitiklio generuojamas lauko slėgis mažėja tolygiai didėjant atstumui, o pats stipriausias signalas gaunamas akustinėje ašyje 22 pav.

Atliekant kompiuterinį modeliavimą ir keičiant keitiklio atstumo parametrus, CIVA aplinkoje gaunamas artimas laukas 22 pav. šiek tiek skiriasi nuo teorinių skaičiavimų. Simuliacijoje naudojamas CIVA programoje gautas artimo lauko dydis (84,9 mm).

22 pav. matyti, kad amplitudės kreivė iki 84,9 mm atstumo yra neprognozuojama ir stipriai svyruoja. Kaip jau minėta tiriant defektus artimame lauke galima netiksliai nustatyti jų dydį ar buvimo vietą. Todėl būtina atlikti tyrimą tolimame lauke. Kreivė 2 (kompozite) palaispniui mažėja didėjant atstumui ir elgiasi prognozuojamai. Kreivė mažėja, nes didėjant bangų sklidimo atstumui ultragarso signalo amplitudė mažėja.



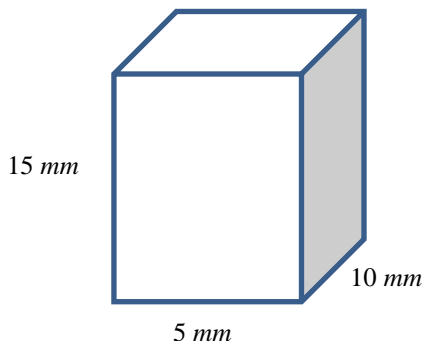
22 pav. CIVA aplinkoje gautas artimas laukas a) Artimas ir tolimas laukas, b) akustinės slėgio amplitudės maksimumas, c) keitiklis ir jo spinduliuojami laukai, raudona spalva pažymėtas tolimas, geltona – artimas laukas

Šiuo atveju atliekama atspindžio imersinio metodo su nefokusuotu keitikliu simuliacija. Todėl bandinys tariamai talpinamas į vandenį ir keitiklio skleidžiamos bangos sklinda vandeniui, o tuomet patenka į tiriamą objektą. Pagal 1 gautą formulę apskaičiuotas artimo lauko atstumas N reiškia, kad keitiklis nuo bandinio turi būti nutolęs 84,9 ~ 85 mm, kad būtų galima tinkamai rasti defektus ir jų dydį.

2.3. Modeliavimo rezultatai

Turint bandinio modelį ir žinant koku atstumu reikia dėti keitiklį atliekami skaičiavimai CIVA aplinkoje ir gaunami modeliavimo rezultatai, kurie išanalizuojami.

Kaip jau minėta 2.2 skyriuje pasirenkamas 85 mm atstumas tarp keitiklio ir bandinio. Atliekant skaičiavimus mums nėra svarbus visas bandinys. Dažniausiai poros atsiranda lonžerono viršuje ties plokštumų susijungimu. Dėl šios priežasties naudojamas „Jautrumo zonos“ parametras, kuris leidžia nustatyti tik tam tikrą zoną, kurioje vyks skaičiavimas. Naudojant jautrumo zoną sumažinamas skaičiavimo laikas. Šiuo atveju jautrumo zonos parametrai pateikiami žemiau:



23 pav. Jautrumo zonos dydis

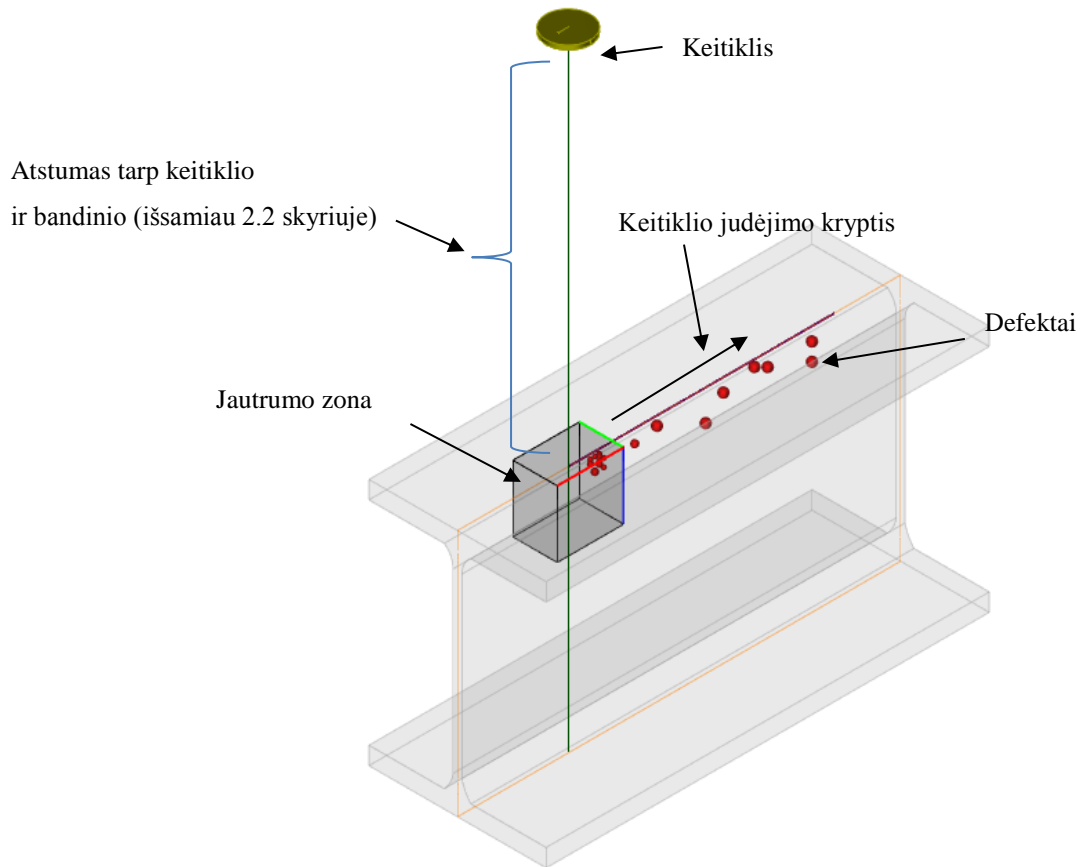
Atliekant simuliaciją naudojami CFRP ir vandens parametrai pateikiami 12 lentelėje

12 lentelė. Pagrindiniai medžiagų parametrai

Medžiaga	Vanduo	CFRP
Tankis	1000 kg/m^3	1494 kg/m^3
Ultragarso bangų greitis	1483 m/s	2400 m/s

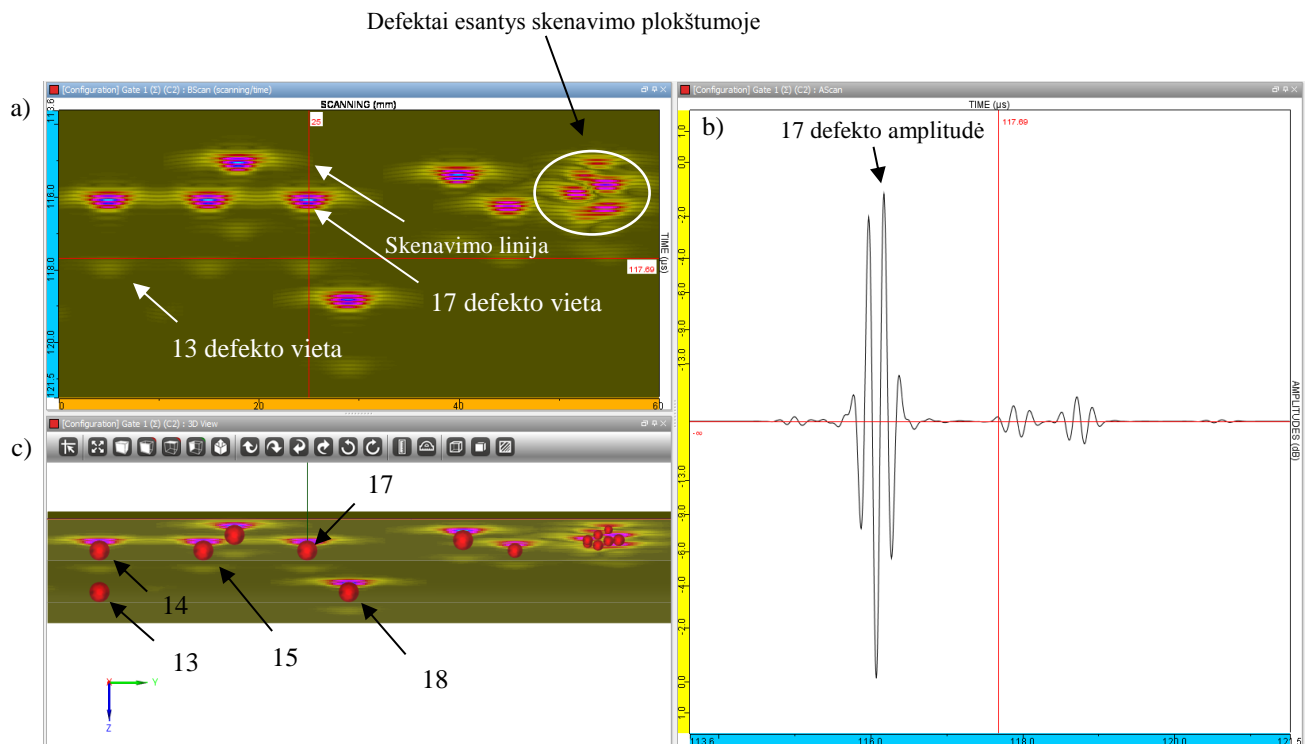
Pradiniams tyrimams pasirenkamas vieno elemento 10 mm skersmens, 5 MHz keitiklis. Tokio dažnio keitikliai dažniausiai naudojami aviaciniams komponentams tirti.

Atlikus modeliavimą (2.1 skyrius) ir skaičiavimus (2.2 skyrius), gaunamas galutinis bandinio modelis, kurio vaizdas pateiktas 24 pav.



24 pav. Modelis su keitikliu, defektais, jautrumo zona ir keitiklio judėjimo linija

Atlikus skaičiavimus, gaunami A, B ir C tipo ultragarso skenavimo vaizdai 25 pav.

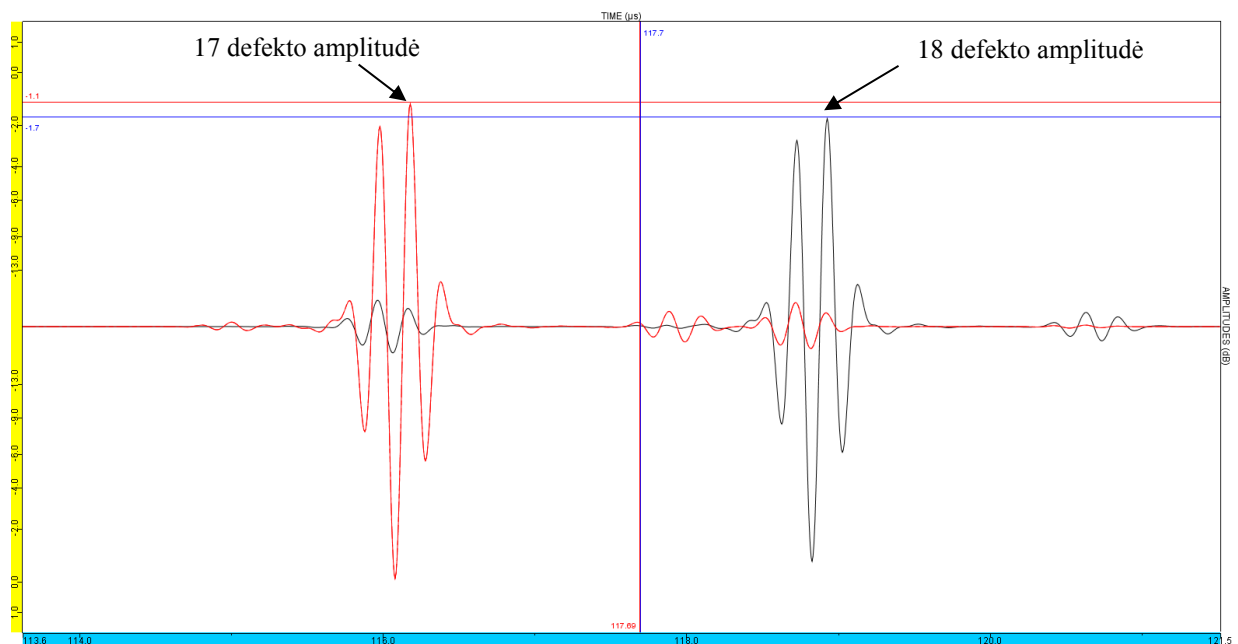


25 pav. a) B-vaizdas; b) A-vaizdas; c) 3D vaizdas

25 pav. b) pavaizduotas A tipo vaizdas ties 17 defektu, nes a) vaizde skenavimo linija kerta 17 defektą.

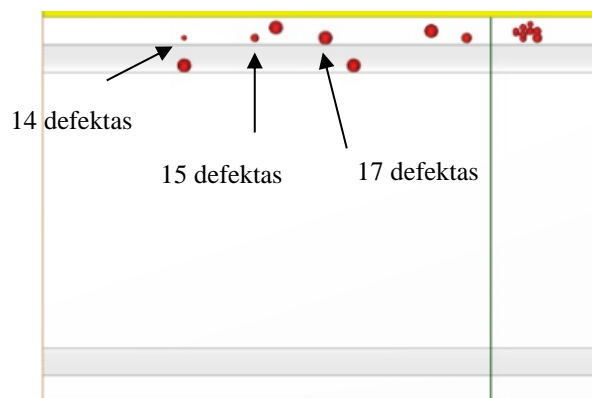
Matome, kad aptinkami defektai esantys tik skenavimo plokštumoje. Defektų sankaupoje esantys defektai nr. 1,4,5,6,7,8,9,10,11,12 B vaizde matomi ne visi. Taip pat matyti, kad B vaizde nematome 13 defekto. Simuliacijoje naudojamas statmenas keitiklis, todėl bangos sklinda statmenai keitiklio kryptimi išilgai į bandinį. Šiuo atveju 14 ir 13 defektai yra lygiai to paties dydžio ir yra toje pačioje plokštumoje, skiriasi tik jų gylis. Skenavimo metu 14 defektas uždengia 13 –tą defektą ir didžioji dalis ultragarso bangų atsispindi nuo 14 defekto taip 13 defektas lieka „pasislėpęs“ ir mes jo neaptinkame.

Norint nustatyti amplitudės priklausomybę nuo defekto gylio matuojami du tokio paties dydžio ir toje pačioje plokštumoje esantys defektai nr. 17 ir nr. 18. 17 Defektas nuo paviršiaus nutolęs 3 mm, o 18 defektas – 7 mm. Matyti, kad atspindėto signalo nuo 17 defekto amplitudė yra 0,6 dB, didesnė.



26 pav. Signalo amplitudės priklausomybė nuo defekto gylio

Siekiant suprasti kaip signalo amplitudė kinta nuo defekto dydžio, sumažinami 14 ir 15 defektai.



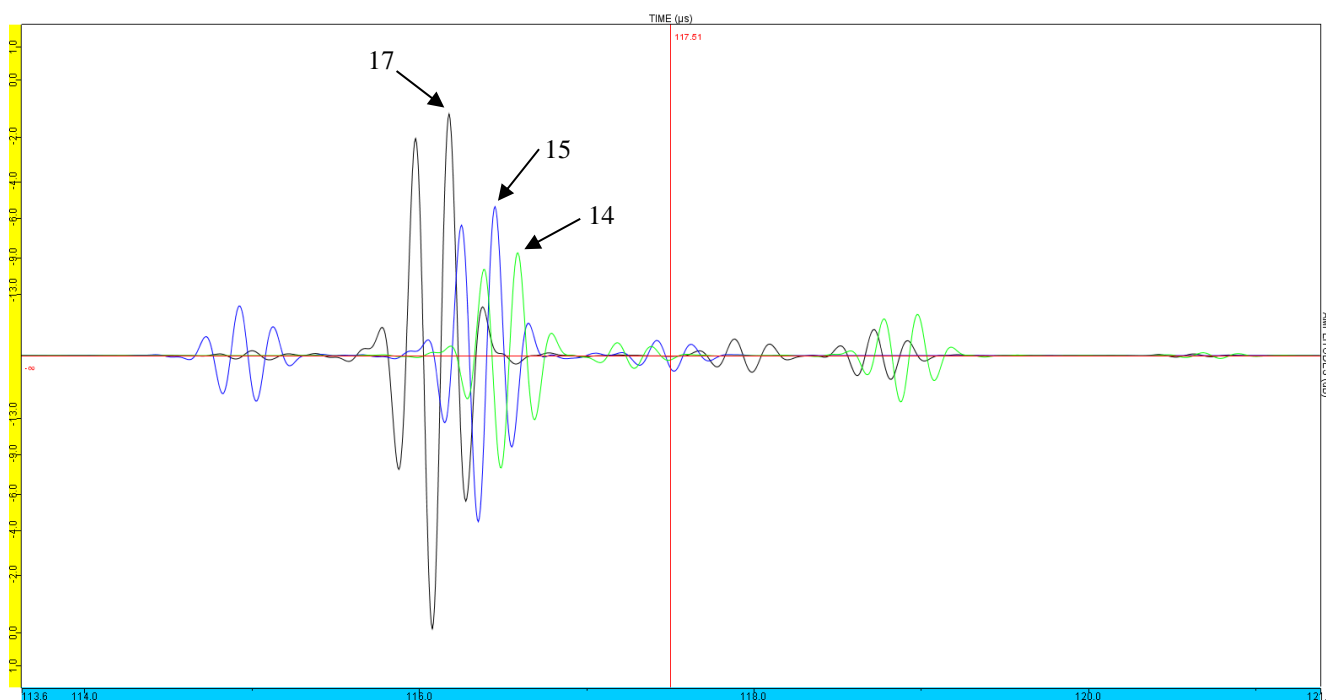
27 pav. Sumažinti defektai A- vaizdo amplitudės palyginimui

12 lentelėje pateikiami sumažintų defektų parametrai.

13 lentelė. Sumažinti defektai A - vaizdo amplitudės palyginimui

Defekto Nr.	Koordinatės, mm			Atstumas nuo paviršiaus, mm	Spindulys, mm
	x	y	z		
14	20	20	-1	3	0.4
15	20	30	-1	3	0.6
17	20	40	-1	3	1

Palyginimui atliekama 3 defektų esančių vienodame gylyje analizė. 14 ir 15 defektai sumažinami atitinkamai iki 0.4 ir 0.6 mm. 28 pav. gaunami amplitudės vaizdai. Matome, jog didžiausia atsispindėjusio signalo amplitudė gaunama nuo to defekto, kuris yra didžiausio skersmens, šiuo atveju defekto nr. 17.



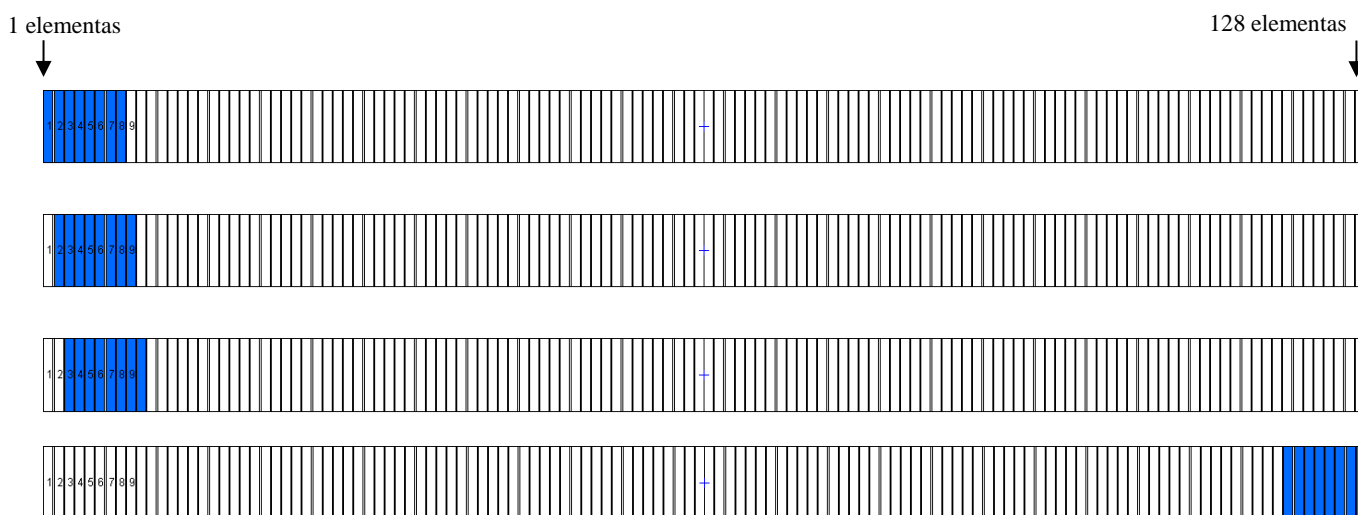
28 pav. Signalų amplitudės priklausomybė nuo defekto dydžio

Matome, jog, naudojant vieną keitiklį, aptinkami ne visi defektai. Panašaus dydžio pažeidimai, esantys toje pačioje plokštumoje, yra „nematomi“. Taip pat, norint ištirti visą bandinį, reikalingas mechaninis skenavimas, t.y reikia stumdyti keitiklį išilgai ir skersai bandinio, kas nėra patogiu.

2.4. Tyrimas naudojant keitiklių gardeles

Atlikus matavimus su vienu keitikliu, nuspręsta naudoti keitiklių gardelių panaudojimo galimybes. Siekiant išvengti ar kuo labiau sumažinti mechaninį skenavimą, bandyme naudojamos keitiklių gardelės. Gardelių privalumai – nereikia bandinio nardinti į vandenį kaip, kad reiktų matuojant su paprastu keitikliu (dėl paprasto keitiklio artimo lauko), gardelės yra kontaktinis matavimo būdas, galima valdyti ultragarso spindulį elektroniškai, lengviau pritaikoma praktikoje.

Naudojant fokusuotų keitiklių gardeles, galima atlikti labai patogią ir greitą ultragarso inspekciją. Gardelės sudarytos iš daug mažų keitiklių. Gardelę gali sudaryti įvairus elementų skaičius. Šiuo atveju bus naudojama 128 elementų gardelė su 8-iais vienu metu sužadinamais elementais. Skenavimas vyksta aktyvinant gardelės elementus žingsnis po žingsnio per visą gardelę išilgai skenavimo krypties. 29 pav. pavaizduota, kaip vyksta skenavimas aktyvinant gardelės elementus. [21]



29 pav. Gardelės elementų aktyvinimas skenuojant

Naudojant gardelę atliekamas elektroninis skenavimas, o ne mechaninis. Jeigu gardelė dengia visą reikiamą objekto paviršių, tuomet skenavimo įrangos ekrane mes galime matyti visus defektus, esančius gardelės zonoje.

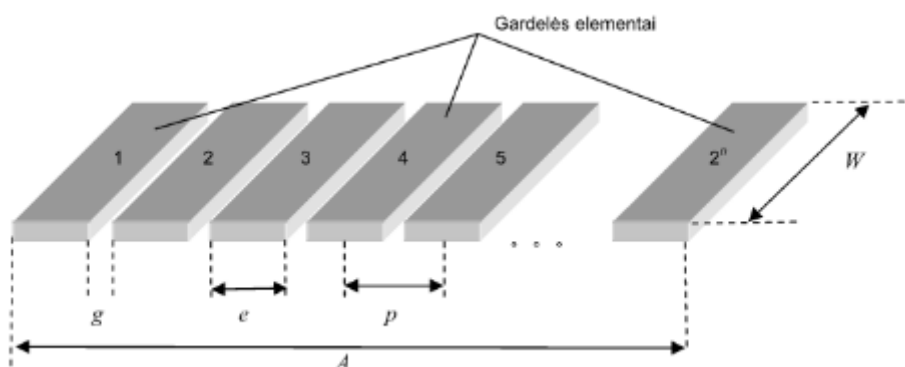
Šiame tyrime planuojama naudoti 2 skirtingas fokusuotų keitiklių gardeles – 3,5 MHz ir 5 MHz.

3,5 MHz keitiklių gardelė turi mažesnę skiriamumą, bet jos signalas slopinamas mažiau. 5 MHz gardelės signalas slopinamas labiau, tačiau skiriamumas geresnis. Atliekant tolimesnę modeliavimą bus siekiama nustatyti, kuri iš dviejų pasirinktų gardelių yra tinkamesnė realiuose matavimuose.

3,5 MHz ir 5 MHz. gardelių charakteristikos pateikiamos 13 lentelėje.

Keitiklis	3.5L64-64x7-NW1-P-2.5-OM	5L128-128x7-NW3-P-2.5-OM
Tipas	Linijinis	Linijinis
Dažnis, MHz	3.5	5
Elementų skaičius	64	128
Aktyvioji apertūra, A, mm	64	128
Pasyvioji apertūra, W, mm	7	7
Elemento plotis, e, mm	0.9	0.9
Tarpas tarp elementų, g, mm	0.1	0.1
Atstumas tarp dviejų gretimų elementų centrų, p, mm	1	1

30 pav. pavaizduoti svarbiausi linijinės gardelės parametrai. Gardelės gali būti pritaikytos beveik visur kur gali būti naudojami paprasti keitikliai.



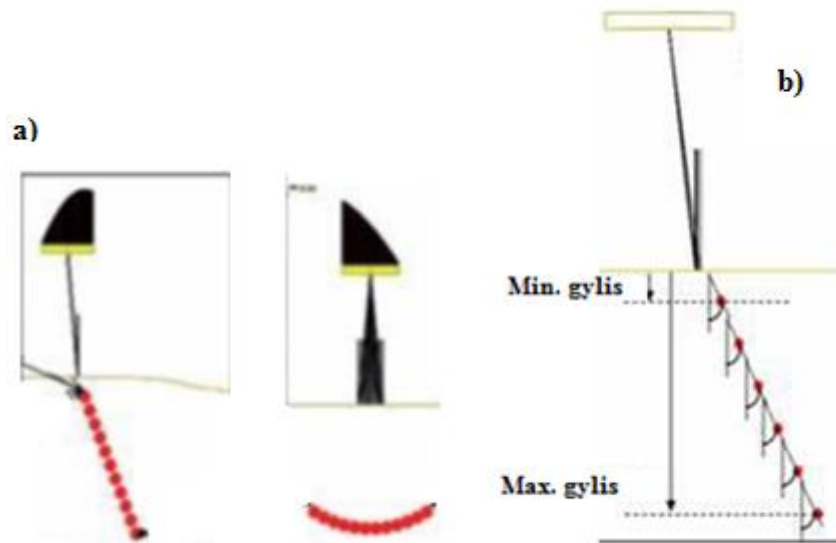
30 pav. Linijinės gardelės parametrai:

A - Aktyvioji apertūra; W - pasyvioji apertūra; e - elemento plotis; g – tarpas tarp elementų; p – atstumas tarp dviejų gretimų elementų centrų [10]

Atliekant simuliaciją CIVA aplinkoje galima matuoti naudojant tiek fokusuotas tiek nefokusuotas gardeles. Norint atlikti tinkamą realų eksperimentą, svarbu nustatyti ar bus reikalingas fokusavimas ir, jei bus, tai kokiame gylyje reiks fokusuoti spindulį. Dėl šios priežasties CIVA aplinkoje sumodeliuojama 5 MHz keitiklių gardelė, su kuria bus atliekamas matavimas nefokusuojant, fokusuojant keliuose taškuose ir fokusuojant keliuose gyliuose.

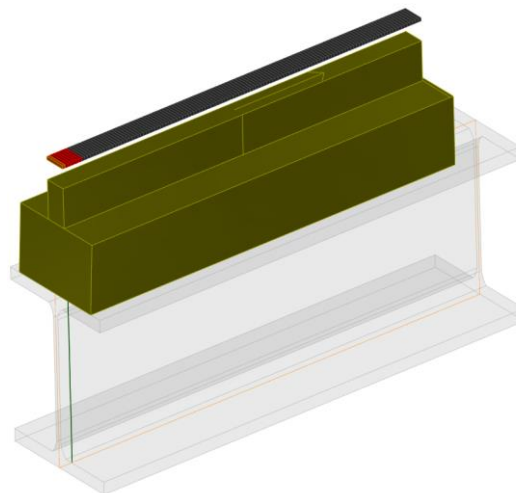
Fokusavimas keliuose taškuose – ši funkcija leidžia sufokusuoti signalą keliuose taškuose nuosekliai. Taškai, kuriuose fokusuojama, gali būti arba gali nebūti sulygiuoti. 31 pav. a)

Fokusavimas keliuose gyliuose – ši funkcija leidžia sufokusuoti signalą tam tikrame gylyje ir tam tikru kampu. X pav. b)



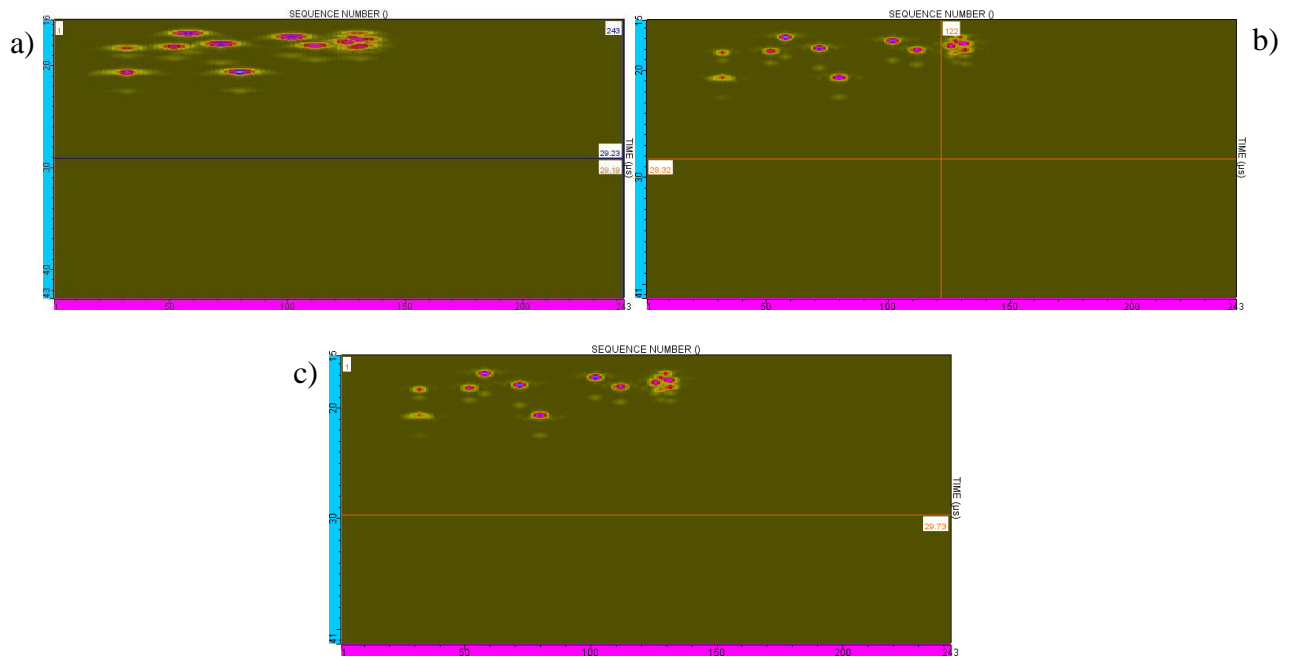
31 pav. a) fokusavimas keliuose taškuose b) fokusavimas keliuose gyliuose

32 pav. pavaizduotas gardės modelis su prizme (vėlinimo linija). Matyti, kad 5MHz 128 elementų gardelė apima visą defektuotą bandinio vietą, todėl mechaninis skenavimas nėra reikalingas ir atliekamas tik elektroninis skenavimas.



32 pav. Gardelės modelis

Atlikus skaičiavimus, palyginimui pateikiami skenavimo vaizdai gauti su nefokusuota gardele 33 pav. a); naudojant kelių taškų fokusavimą x pav. b); ir naudojant kelių gylių fokusavimą x pav.c).



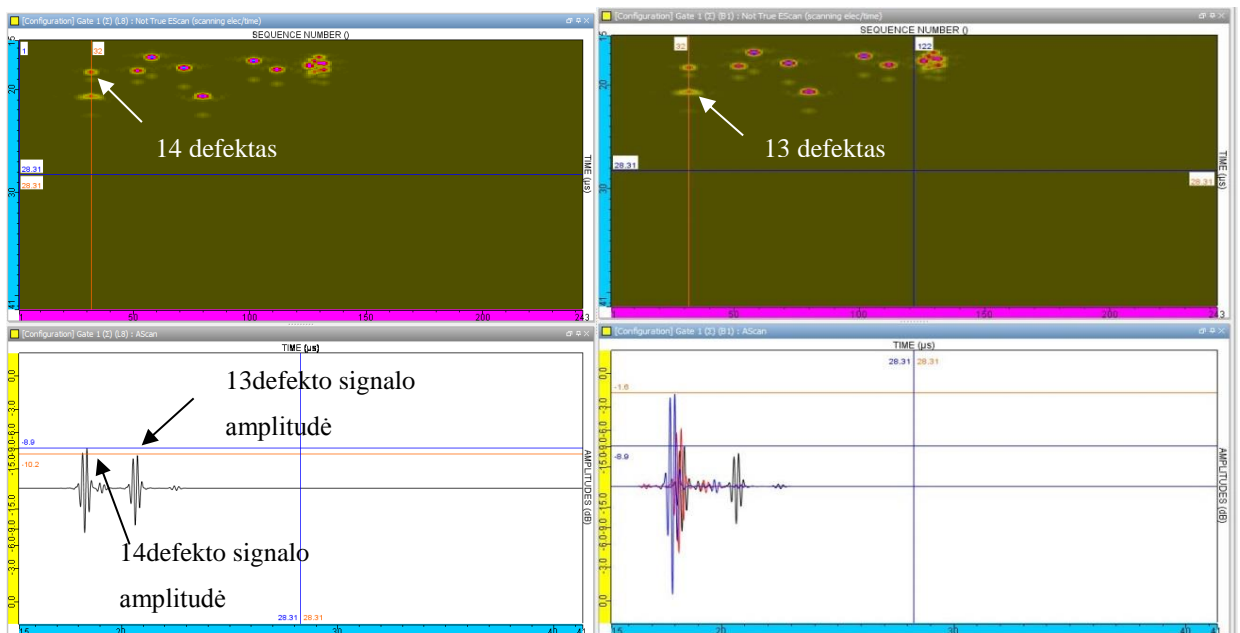
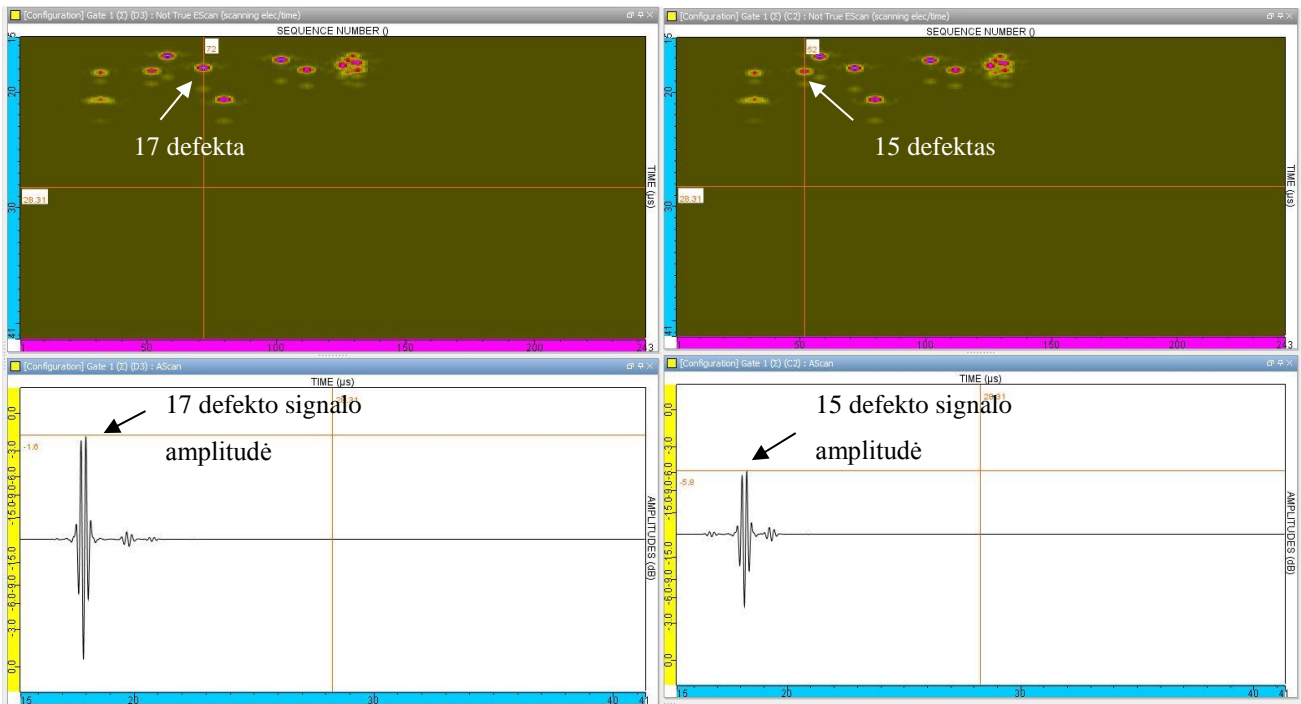
33 pav. Tyrimas naudojant gardelę a) nefokusuota b) fokusavimas keliuose taškuose c) fokusavimas keliuose gyliuose

Matyti, jog nefokusuoto signalo rezultatai nėra tikslūs. Naudojant fokusavimą keliuose gyliuose gaunami šiek tiek tikslesni defektų vaizdai, lyginant su fokusavimu keliuose taškuose, todėl tolesni matavimai ir duomenų analizavimas atliekami fokusuojant signalą keliuose gyliuose.

Kaip ir 2.3 skyrelyje atliekama signalo priklausomybės nuo defekto dydžio analizė. Tiriami 14, 15 ir 17 defektai, kurie yra viename gylyje, tačiau jų skersmuo skiriasi.

15 lentelė. Defektai A - vaizdo amplitudės palyginimui

Defekto Nr.	Koordinatės, mm			Atstumas nuo paviršiaus, mm	Spindulys, mm
	x	y	z		
14	20	20	-1	3	0,4
15	20	30	-1	3	0,6
17	20	40	-1	3	1
18	20	44	3	7	1

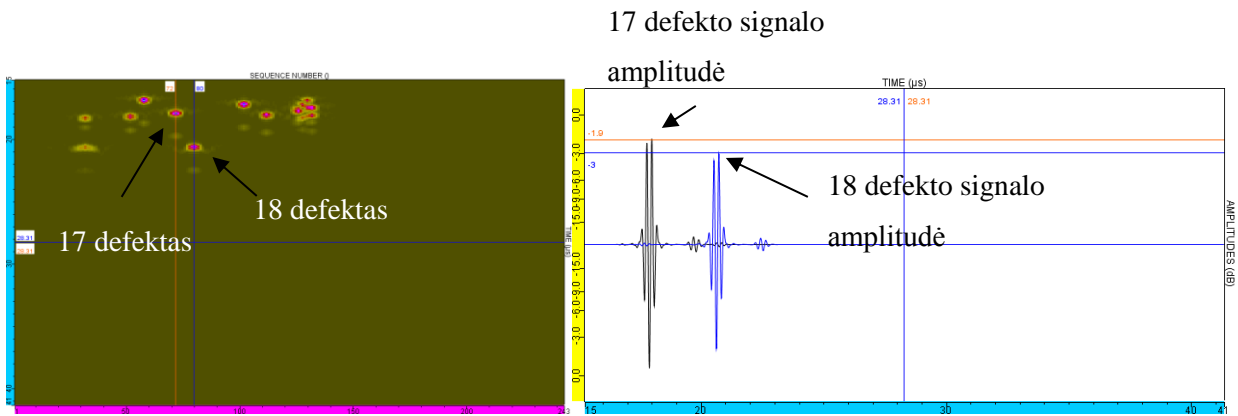


34 pav. Signalų amplitudės priklausomybė nuo defekto dydžio

Kaip matyti, gaunami panašūs rezultatai kaip ir matuojant su paprastu keitikliu. 17 defekto signalo amplitudė yra didžiausia, nes jo skersmuo didžiausias.

Svarbu paminėti tai, kad naudojant gardeles, yra matomas 13 defektas, nors jis ir yra po 14 defektu. Naudojant paprastą keitiklį 13 defektas nebuvo aptiktas.

Norint nustatyti signalo amplitudės priklausomybę nuo defekto gylio atliekama 17 ir 18 defektų analizė.

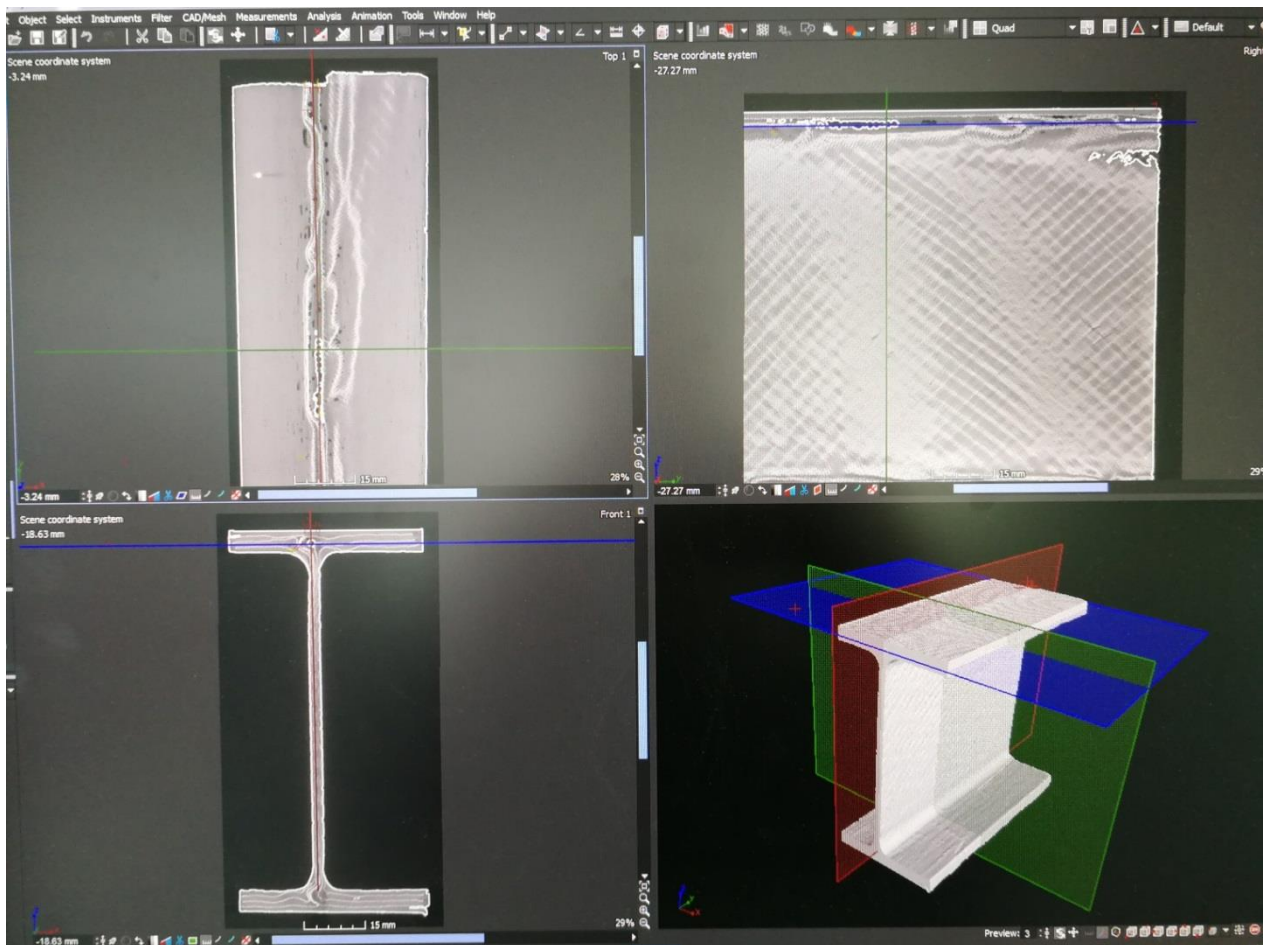


35 pav. Signalo amplitudės priklausomybė nuo defekto gylis

17 defekto signalo amplitudė yra didesnė 1,1 dB, nes defektas yra arčiau ir ultragarso spindulys atsispindėjęs grįžta greičiau, taip prarasdamas mažiau energijos.

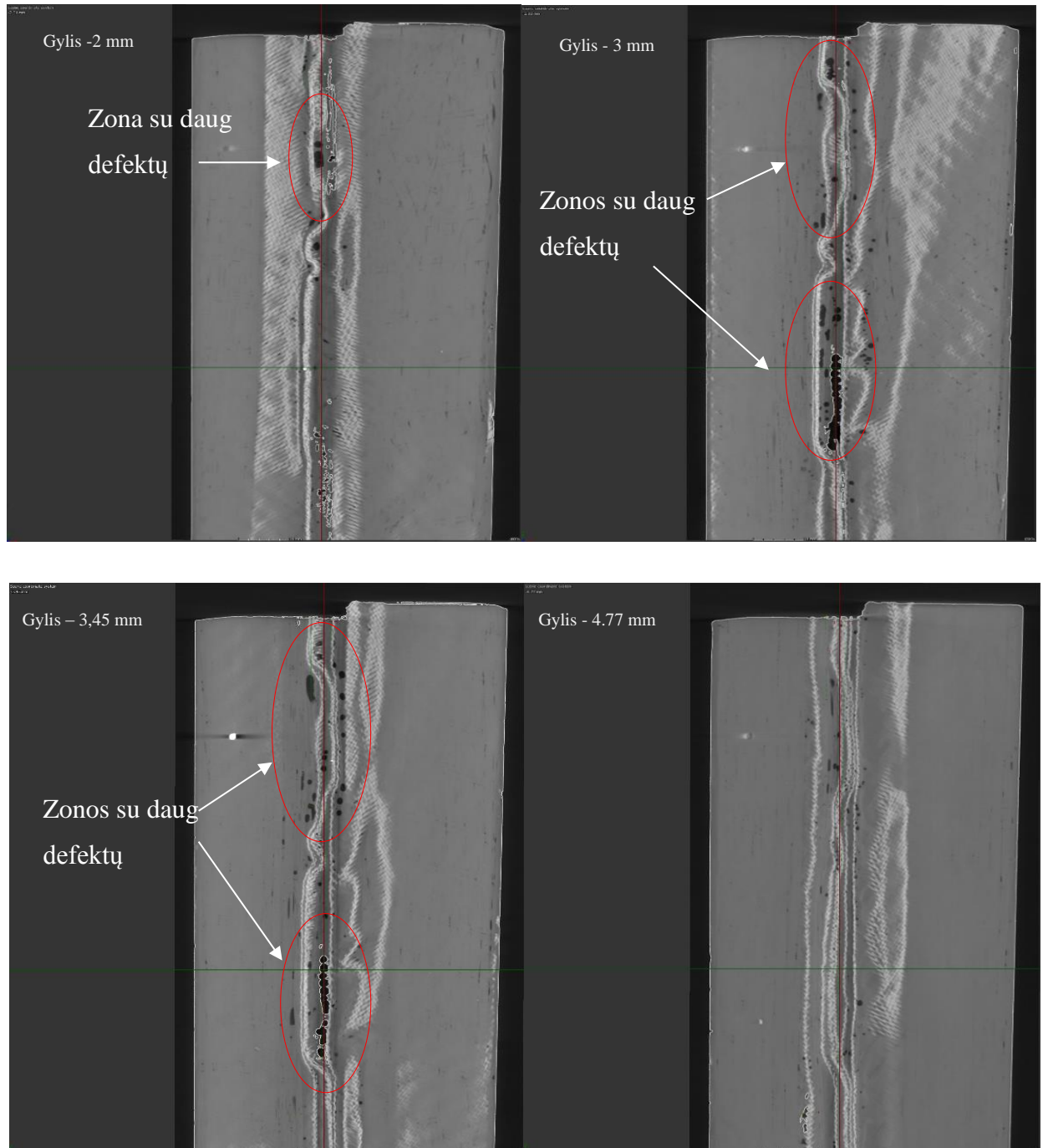
2.5. Kompiuterinė tomografija

Siekiant sumodeliuoti kuo realesnį bandinio modelį, bandinys buvo ištirtas rentgenu ir atlikta jo kompiuterinė tomografija. 36 pav. pavaizduotas vaizdas gaunamas analizuojant kompiuterinės tomografijos duomenis su programa VGStudio MAX 3.1. Gaunami visų projekcijų vaizdai kiekviename bandinio gilyje.



36 pav. Kompiuterinės tomografijos rezultatai

37 pav. detaliai vaizduojami vaizdai tam tikruose detalės gyliuose. Raudonai pažymėtos zonos, kuriose porozijos kiekis yra didžiausias. Kaip matyti, daugiausia defektų yra 3 – 3,45 mm gylyje. Defektai yra apie 1-1,4 mm dydžio skersmens. Matome, kad defektai išsidėstę ties bandinio viduriu, ten kur gaminio geometrija sudėtingiausia ir anglies pluošto sluoksniai sulenkiami. Kai kurie defektai sudaro tarsi oro burbuliukų tandemus, taip sukurdami vieną didelį defektą, kurio ilgis siekia net 10-15 mm. 4,77 mm gylyje defektai pavieniai ir gana maži – 0,4 - 0,8 mm skersmens.

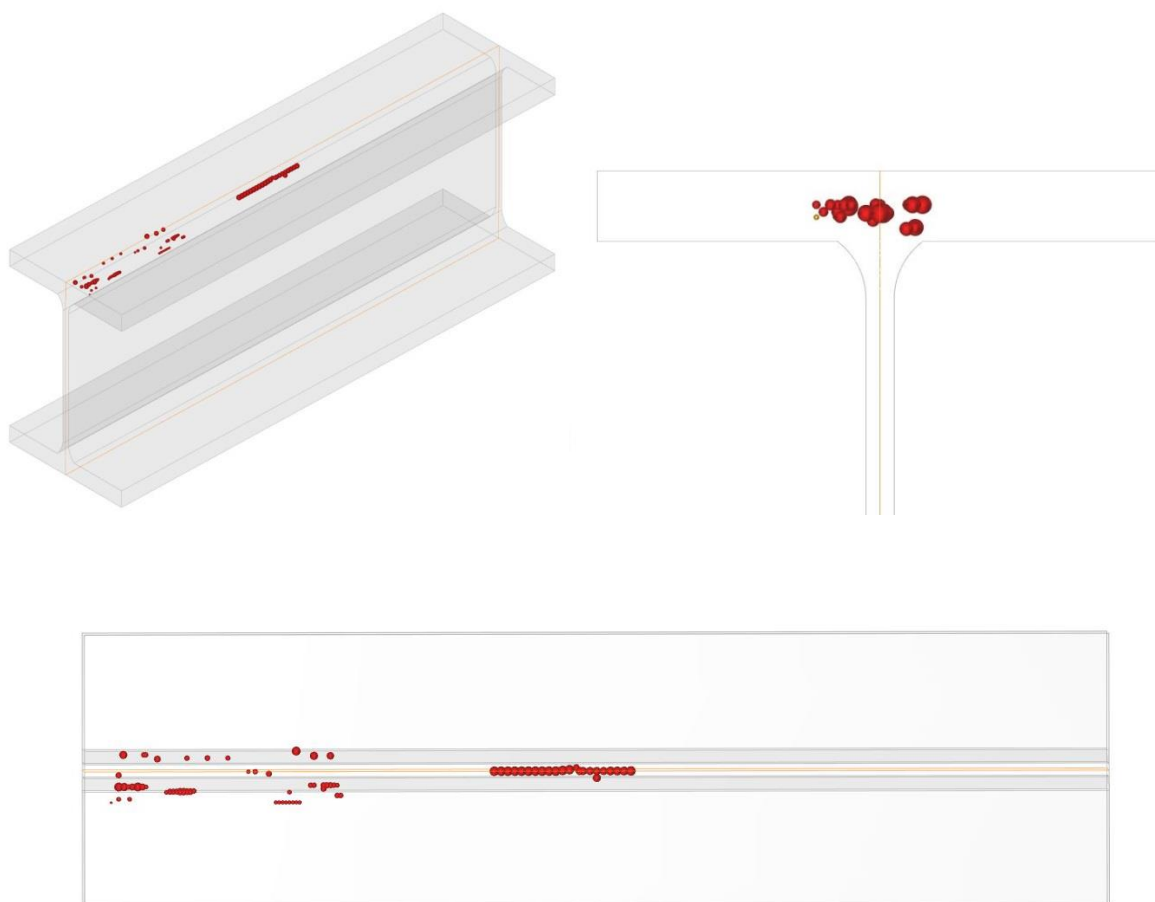


37 Pav. Bandinio struktūros vaizdai įvairiuose gyliuose

Naudojant kompiuterinę tomografiją galima neprikaištingai ištirti bandinio morfologiją ir gauti aiškius struktūros vaizdus, tačiau tai užima daug laiko ir reikia sudėtingos įrangos. Gauti rezultatai bus naudojami atliekant tolimesnę ultragarso kompiuterinę simuliaciją ir realius matavimus.

2.6. Defektai pagal kompiuterinės tomografijos rezultatus

Atlikus kompiuterinę tomografiją ir išanalizavus gautus rezultatus, modelyje suprojektuoti 85 defektai. Defektai projektuoti atsižvelgiant į jų realią poziciją ir dydį tiriamame objekte. Suprojektuoti defektai, kurių dydis kinta nuo 0,4 mm skersmens iki 1,4 mm skersmens. Defektai išsidėstę daugiausia ties objekto viduriu įvairiame gylyje: nuo 2,4 mm iki 4,7 mm atstumu nuo paviršiaus.

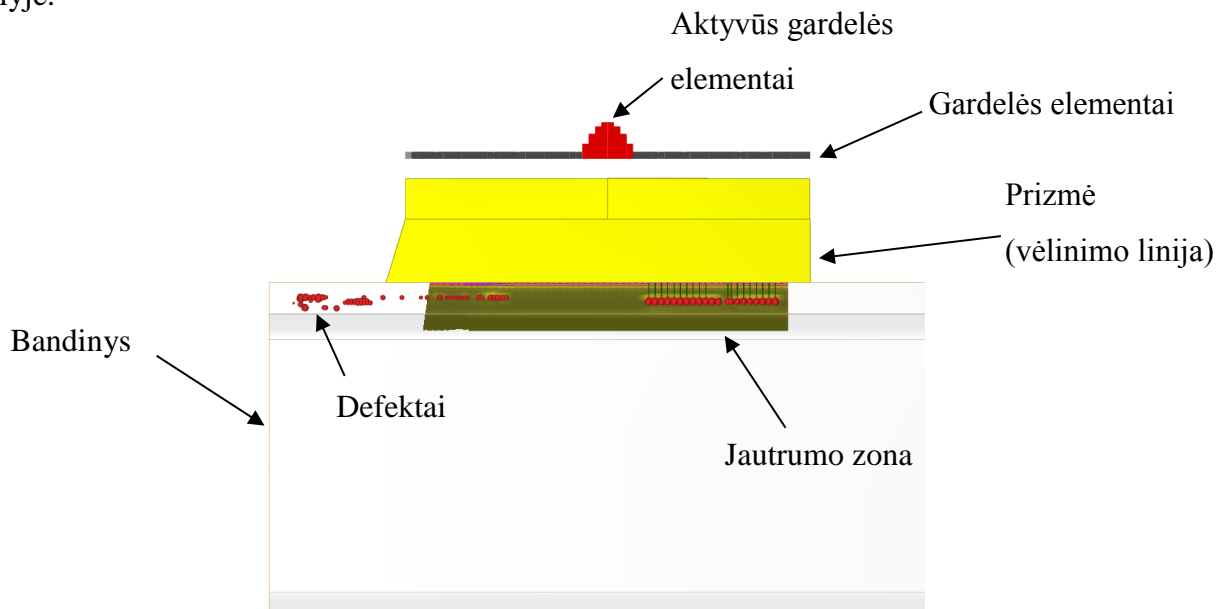


38 pav. defektai pagal kompiuterinės tomografijos rezultatus

Kaip matyti 38 paveiksle, oro burbuliukų išsidėstymas turi tam tikrą tendenciją. Daugiausia nevienalytiškumą atsiranda ties bandinio viduriu, ten kur kompozito geometrija sudėtingiausia ir sluoksniai susilenkia.

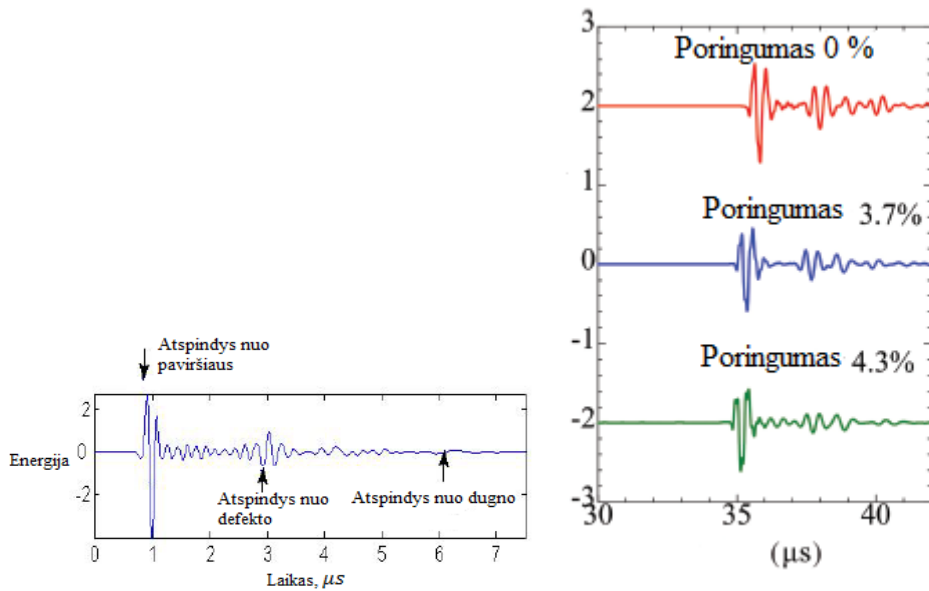
2.6.1. Matavimai su 3.5 MHz gardele

Atliekamas matavimas naudojant kontaktinę 3,5 MHz gardele. 39 pav. pavaizduotas gardelės ir bandinio modelis. 3,5 MHz gardelė turi 64 elementus, iš kurių vienu metu aktyvuojami 8. Matome, kad gardelė neapima visų defektų, todėl neužteks vien tik elektroninio skenavimo ir bus reikalingas mechaninis skenavimas. Atsižvelgiant į kompiuterinės tomografijos rezultatus signalas fokusuojamas 3 mm gylyje.

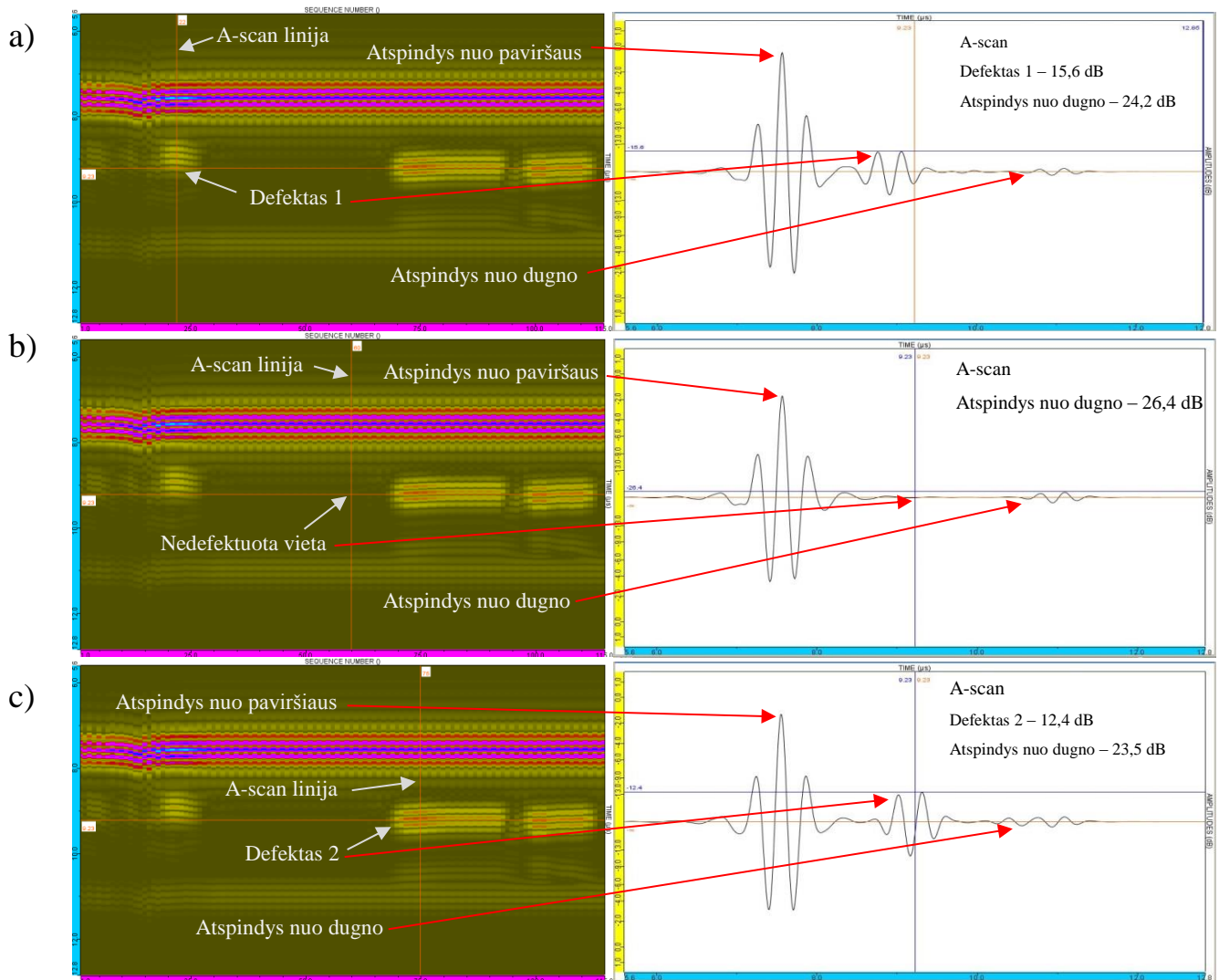


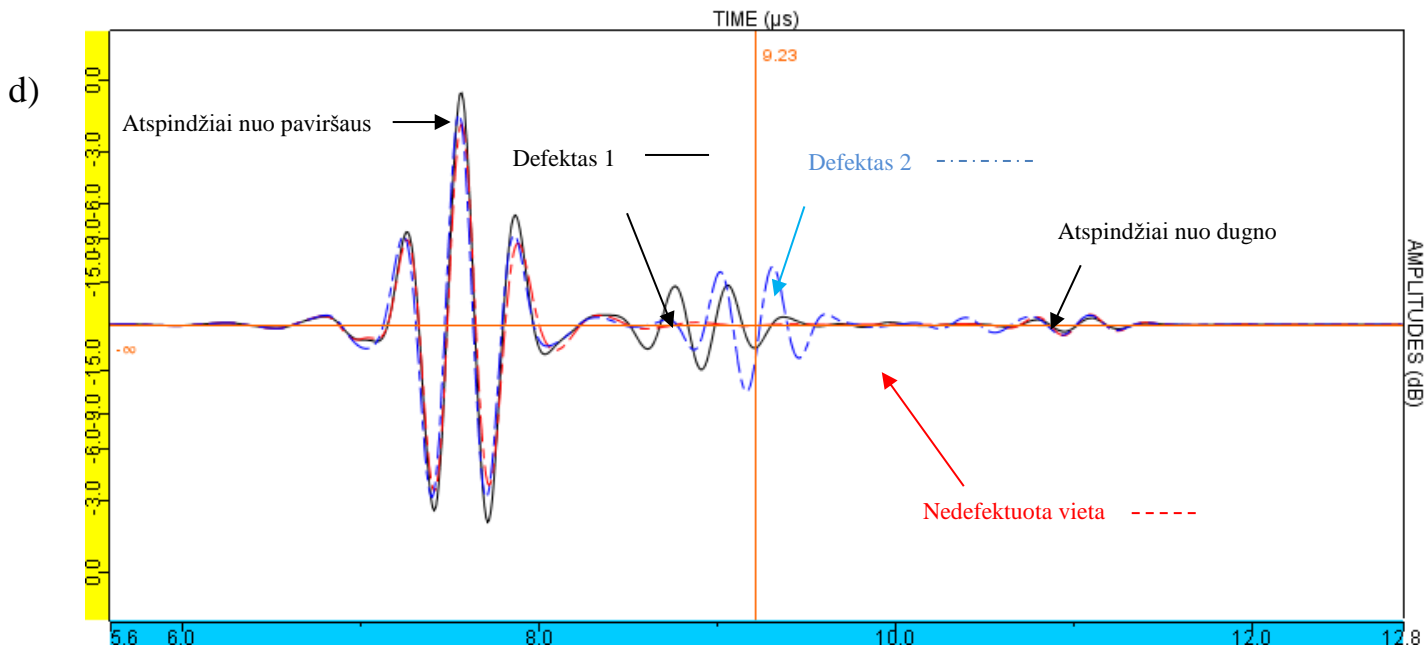
39 pav. Tyrimo naudojant 3,5 MHz kontaktinės gardelės modelis

Atlikus skaičiavimus rezultatai pateikiami 41 pav. žemiau. Matome, kad daugiausia ultragarso energijos atsispindi nuo paviršiaus, todėl signalas ten yra didžiausias. Signalo atspindys nuo paviršiaus matomas 41 Pav. a) kairėje pusėje (raudona linija viršuje), o dešinėje pusėje A tipo vaizde matoma signalo amplitudė, kuri lyginant su defektų amplitudėmis yra 3-4 kartus didesnė. Atspindys nuo dugno yra didžiausias ties ta vieta kur skenavimo linija nekerta defektų. Atspindžio nuo defektų amplitudė yra 1,5-1,8 karto didesnė, nei atspindžio nuo dugno. Palyginimui pateikiami mokslininkų Nicolas Dominguez et al [31] tyrimo rezultatai, gauti atliekant poringumo tyrimą CFRP kompozite su dideliu kiekiu porozijos naudojant ultragarso metodą. Matome, kad atspindžio nuo dugno beveik nesimato dėl didelio defektų kiekio.



40 pav. Amplitudės priklausomybė nuo defektų poringame kompozite [25] [24]



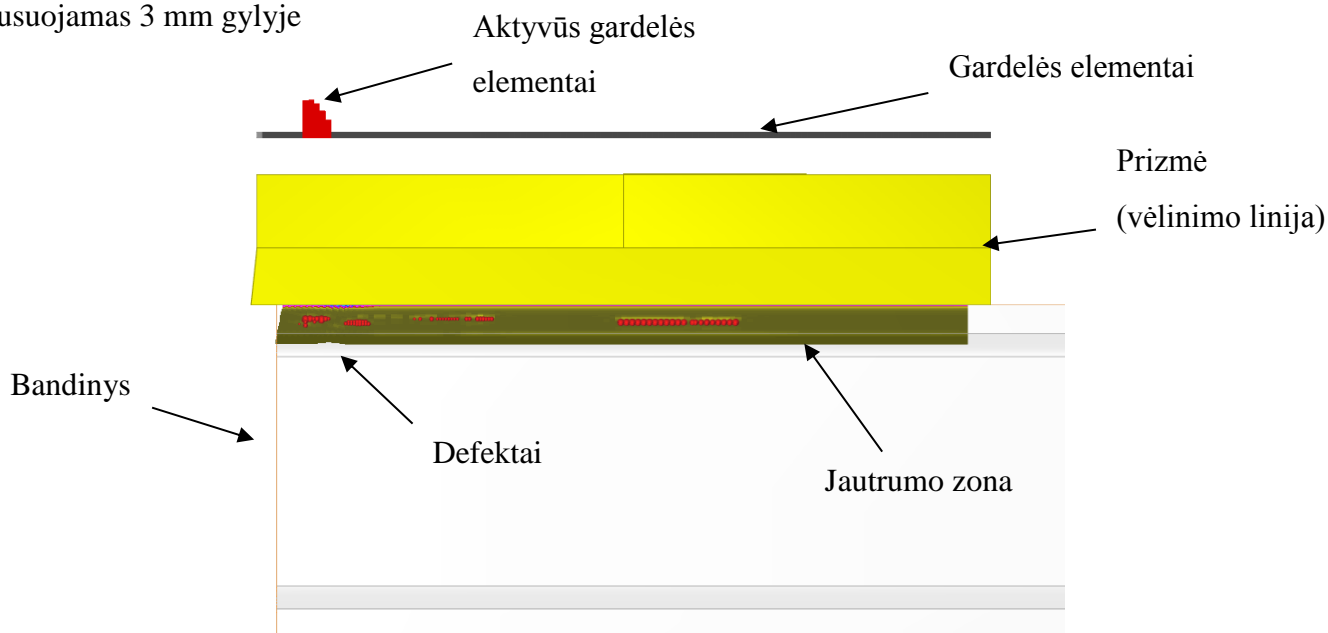


41 pav. 3,5 MHz gardelės matavimo rezultatai

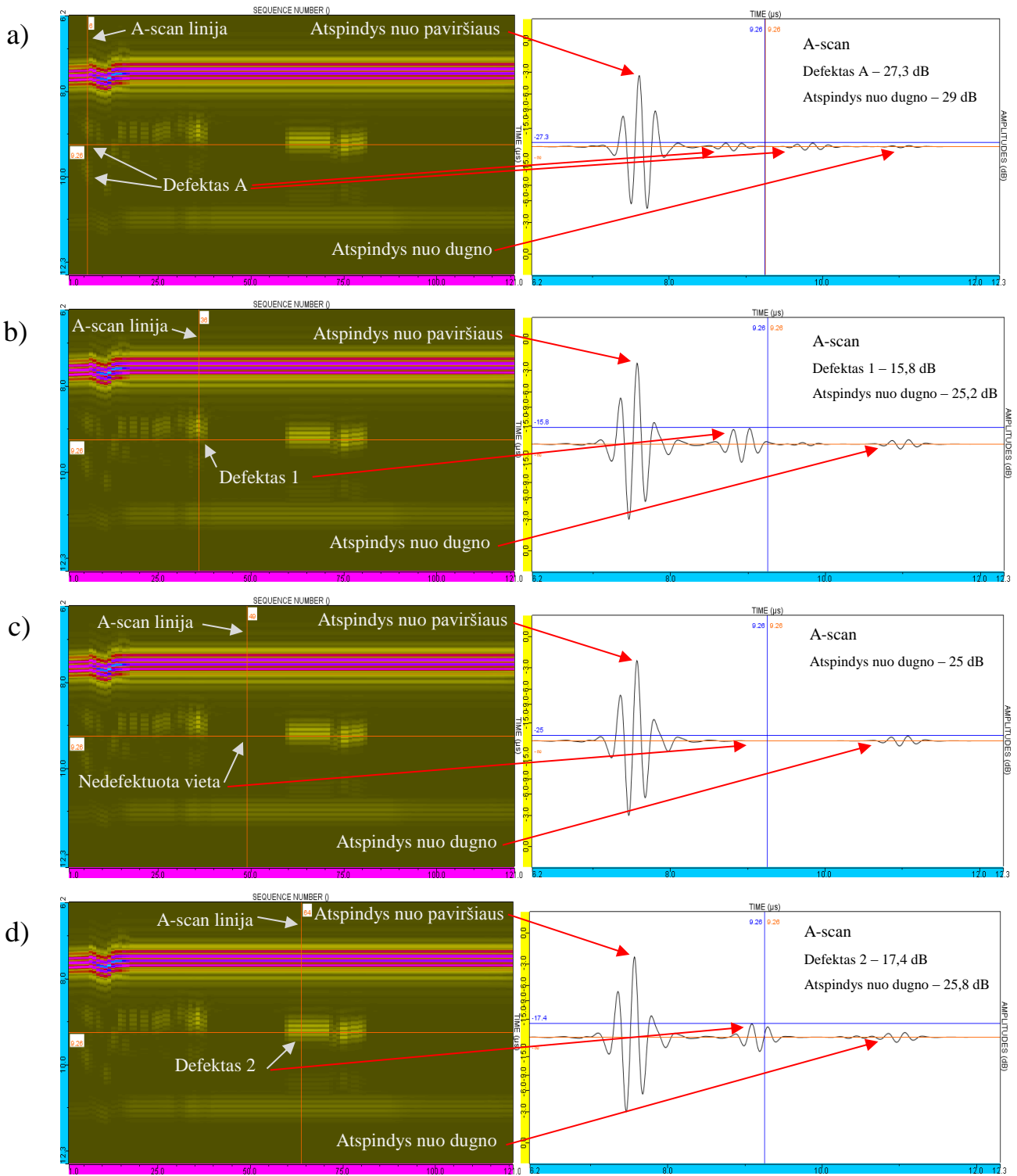
Atlikus simuliaciją naudojant 3,5 MHz kontaktinę gardelę, matome, kad didžiausia atspindžio nuo defekto signalo amplitudė yra ten, kur defekto dydis yra didžiausias.

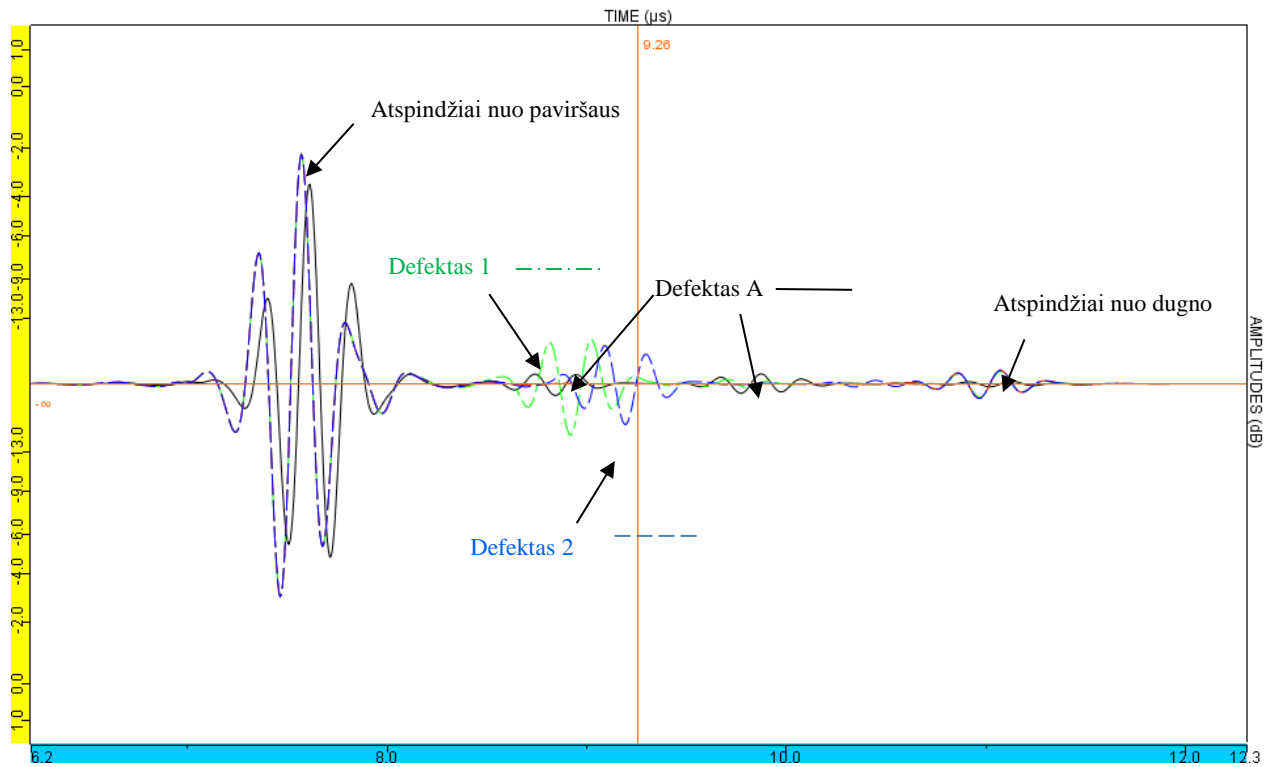
2.6.2. Matavimai su 5 MHz gardele

Atliekamas matavimas naudojant kontaktinę 5 MHz gardelę. 42 pav. pavaizduotas gardelės ir bandinio modelis. 5 MHz gardelė turi 128 elementus, iš kurių vienu metu aktyvuojami 8 elementai. Matome, kad gardelė apima visus defektus, todėl užteks vien tik elektroninio skenavimo ir mechaninis skenavimas bus nereikalingas. Atsižvelgiant į kompiuterinės tomografijos rezultatus signalas fokusuojamas 3 mm gylyje.



42 pav. 5 MHz kontaktinės gardelės modelis





43 pav. 5 MHz gardelės matavimo rezultatai

Atlikus simuliaciją su 5 MHz gardele gauti rezultatai yra labai panašūs į rezultatus su 3,5 MHz gardele.

Palyginimui pateikiama matavimo rezultatų lentelė. Lyginami 1 ir 2 defektai bei atspindžiai nuo dugno esantys po 1 ir 2 defektu ir ties nedefektuota vieta.

16 lentelė. Matavimų rezultatų palyginimas

Gardelės dažnis	3,5 MHz Gardelės signalo amplitudė, dB	5 MHz Gardelės signalo amplitudė, dB
Defektas 1	-15,6	-15,8
Defektas 2	-12,4	-17,4
Atspindys nuo dugno ties 1 defektu	-24,2	-25,2
Atspindys nuo dugno ties 2 defektu	-23,5	-25,8
Atspindys nuo dugno ties nedefektuota vieta	-26,4	-25

Kadangi 5 MHz gardelė didesnė, todėl pateiktuose vaizduose galime matyti visus defektus iš karto. Vaizduose su 3,5 MHz gardele vienu metu matoma tik dalis defektų.

Iš rezultatų palyginimo matome, kad signalo amplitudė ties 1 defektu tiek su 3,5 MHz tiek su 5 MHz gardele yra labai panaši – skiriasi tik 0,2 dB. Taip pat atspindys nuo dugno ties 1 defektu skiriasi tik 1 dB. Atspindys ties 2 defektu skiriasi 5 dB, o atspindys nuo dugno ties 2 defektu skiriasi 2,3 dB. Taip yra todėl, kad matuojant su 3,5 MHz gardele gauti defektų vaizdai yra ryškesni. 5 MHz gardelės signalas slopinamas labiau, todėl tikėtina, kad dėl to rezultatai su 5MHz gardele yra prastesni.

2.7. Apibendrinimas

Atliktas kompiuterinis modeliavimas matuojant su paprastu keitikliu, nefokusuota gardele ir fokusuotomis kontaktinėmis 3,5 MHz ir 5 MHz gardelėmis. Atsižvelgiant į gautus rezultatus nuspręsta realų matavimą atlikti su fokusuotomis kontaktinėmis 3,5 MHz ir 5 MHz gardelėmis. Naudoti paprastą keitiklį būtų nepatogu, nes jis gana mažas, todėl matavimas užtruktų daug ilgiau. Taip pat su paprastu keitikliu atrandami ne visi defektai. Tie defektai, kurie yra panašaus dydžio ir vienas po kitu, nėra aptinkami. Tikėtina, kad naudojant paprastą keitiklį, realiame eksperimente būtų prarandama daug informacijos ir matavimai būtų netikslūs.

Naudojant nefokusuotas gardeles, gaunami vaizdai yra gana netikslūs, signalas išsklaidomas, atspindžiai nuo defektų gana dideli ir dengia vienas kitą, todėl sunku išskirti defektus.

Realiam matavimui pasirenkamos fokusuotos kontaktinės gardelės dėl savo privalumų lyginant su paprastu keitikliu ir nefokusuotomis gardelėmis. Fokusuojant signalą gauname tikslesnius defektų vaizdus. Tikėtina, kad naudojant fokusuotas gardeles, realaus eksperimento metu bus gaunami tikslesni matavimai.

Atlikus simuliaciją su dviem skirtingais dažniais matyti, kad naudojant 3,5 MHz gardele gauname šiek tiek tikslesnius rezultatus. Realus eksperimentas bus atliekamas su abiejų dažnių gardelėmis.

3. Eksperimentinė dalis

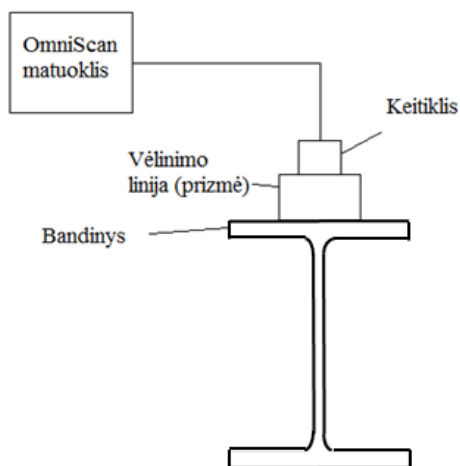
Eksperimentinės dalies tikslas yra patikrinti kompiuteriniu modeliavimu parinktų metodikų tinkamumą gaminių iš anglies pluoštu armuoto plastiko kokybės patikrai.

Įvertinus kompiuterinio modeliavimo rezultatus, eksperimentiniams tyrimams atlikti buvo parinktos 3,5 MHz ir 5 MHz gardelės, kurios buvo jungiamos prie gamybinėmis sąlygomis naudojamos OmniScan sistemos pavaizduotos 44 pav.



44 pav. Olympus OmniScan MX matavimo sistema [22]

45 pav. pavaizduota matavimo struktūrinė schema. OmniScan sistema jungiama prie gardelės, kuri įstatoma į organinio stiklo prizmę. Prizmė naudojama kaip vėlinimo linija, kad atliekant plonų gaminių kontrolę, būtų lengviau analizuoti priimtus signalus, kai keitiklis ar gardelė naudojami ir signalų siuntimui ir priėmimui [13]



45 pav. Matavimo struktūrinė schema

Matavimo schema yra labai paprasta todėl tokį eksperimentą nesunku atlikti gamybinėmis sąlygomis ir gauti greitus detalių ar konstrukcijos kokybės įvertinimus.

3.1. Ultragarso greičio nustatymas tiriamame bandinyje

Kiekvienoje medžiagoje ultragarso bangos sklidimo greitis yra skirtingas todėl prieš atliekant eksperimentinius matavimus svarbu nustatyti, koks ultragarso bangos greitis yra tiriamame objekte. Ultragarso banga kietose medžiagose sklinda greičiau, o minkštose – lėčiau. Kadangi tokie sluoksniuoti kompozitai kaip CFRP yra sudaryti iš anglies pluošto ir epoksidinės dervos, ultragarso greitis kinta priklausomai nuo sluoksnio, per kurį sklinda ultragarso banga, nuo pagaminimo kokybės, sluoksnių skaičiaus ir medžiagų. Pagaminimo kokybę įtakoja defektų skaičius bandinyje. Kaip jau minėta 1.1 skyrelyje, pagrindinis CFRP kompozitų defektas yra poringumas. Oro tarpeliai esantys bandinyje stipriai išsklaido ultragarso bangas ir tiesiogiai įtakoja ultragarso signalo slopinimą [2]. Žinant ultragarso greitį tiriamame objekte, galima tiksliau įvertinti defektų padėtį ir dydį.

Siekiant nustatyti ultragarso greitį bandinyje, buvo atlikti 10 matavimų skirtingose bandinio vietose - 47 pav. 46 pav buvo naudojamas nefokusuotas 5 MHz keitiklis, kurio parametrai pateikiami 16 lentelėje.

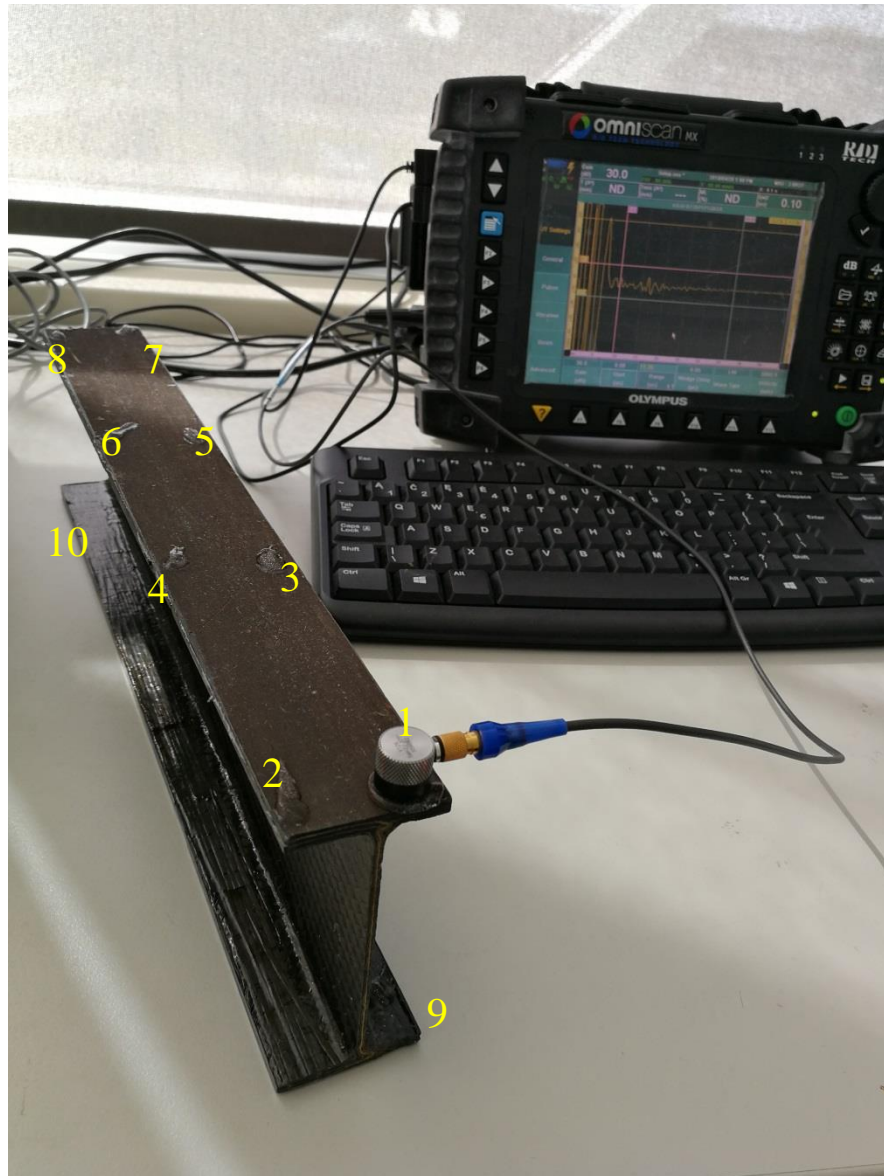


46 pav. Naudojamas keitiklis ir kalibravimo plokštelė

17 lentelė. 5 MHz paprasto keitiklio parametrai

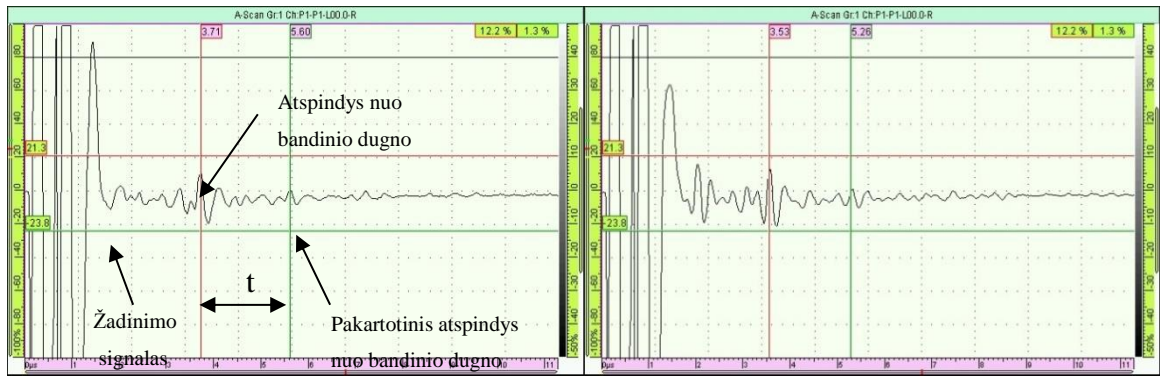
Keitiklio pavadinimas ir dalies numeris	Ultragarso keitiklis V126
Keitiklio tipas	Kontaktinis
Dažnis	5 MHz
Elemento dydis (diametras)	9.5 mm (.375 IN DIA)

47 pav. matyti bandinys ir matavimo sistema. Bandinyje sunumeruotos tyrimo vietos.



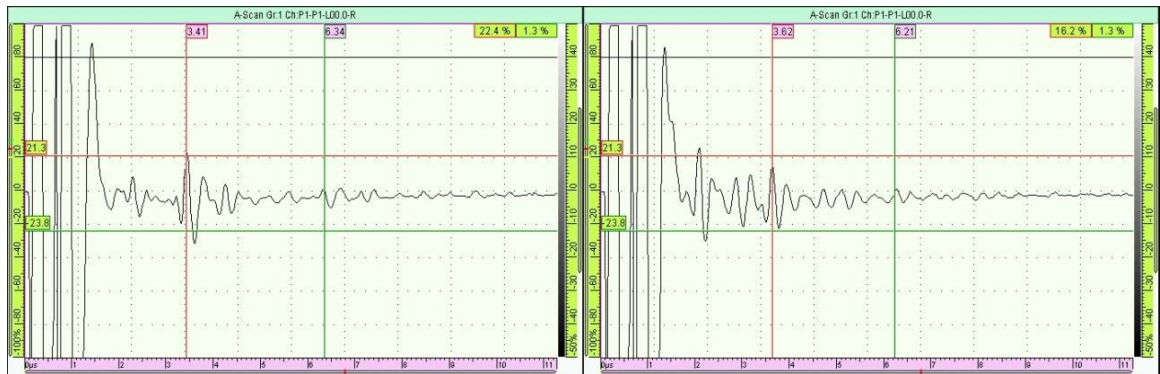
47 pav. Matavimai ultragarso greičiui nustatyti

Atlikus matavimus rezultatų vaizdai su signalo atspindžiais pateikiami 48 paveikslėlyje. Kreivės pradžioje matomas išspinduliuotas impulsas (žadinimo signalas), o po tam tikro laiko tarpo matome nuo objekto dugno atspindėtus signalus. Skaičiavimams bus naudojamas laiko intervalas tarp dviejų pasikartojančių signalo atspindžių nuo dugno.



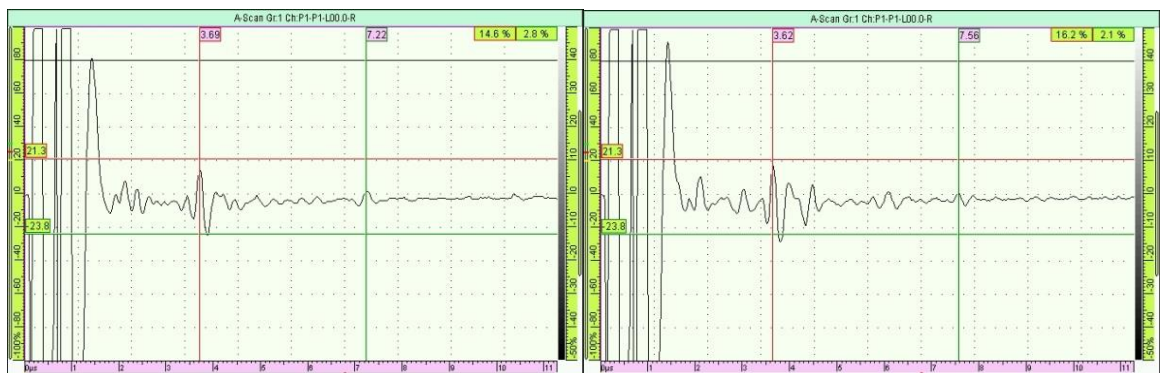
a) Matavimo vieta 1

b) Matavimo vieta 2



c) Matavimo vieta 3

d) Matavimo vieta 4



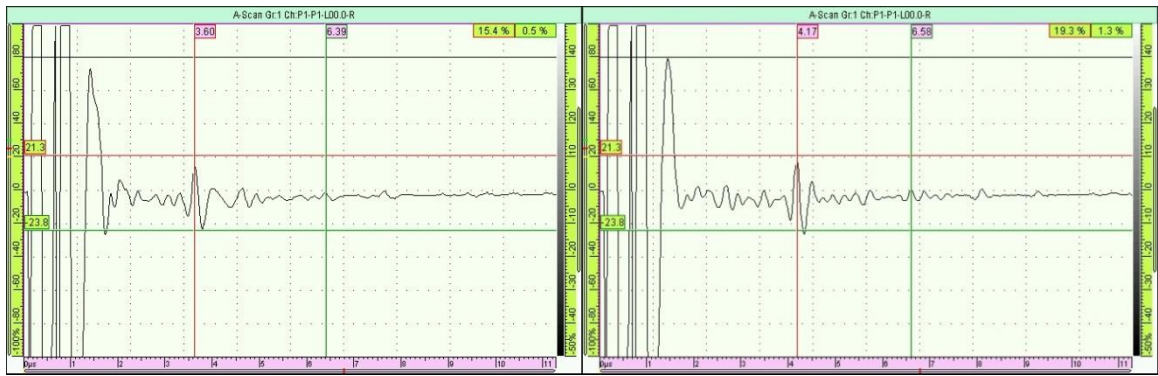
e) Matavimo vieta 5

f) Matavimo vieta 6



f) Matavimo vieta 7

g) Matavimo vieta 8



h) Matavimo vieta 9

i) Matavimo vieta 10

48 pav. Ultragarso signalai laiko srityje

Duomenys iš gautų matavimų surašomi į 17 lentelę. Kaip matyti iš 3.1.1 formulės skaičiavimams taip pat reikalingas bandinio storis, kuris kinta priklausomai nuo bandinio vietos.

$$V = \frac{2H}{t} \quad 3.1.1$$

H- bandinio storis; t – signalo sklidimo trukmė iki dugno.

18 lentelė Ultragarso greičio matavimo rezultatų lentelė

Matavimo vieta	Storis, H, mm	Laikas, t, s	Apskaičiuotas greitis, V, m/s
1	5,1	5,6 – 3,71 = 1,89	5396,8
2	5,1	5,26 – 3,53 = 1,73	5895,9
3	4,5	6,34 – 3,41 = 2,93	3071,6
4	5,1	6,21 – 3,62 = 2,59	3938,2
5	5,5	7,22 – 3,69 = 3,53	3116,1
6	5,5	7,56 – 3,62 = 3,94	2791,8
7	5,2	7,48 – 3,8 = 3,68	2826,08
8	5,2	7,41 – 3,95 = 3,46	3005,7
9	4,5	6,39 – 3,6 = 2,79	3225,8
10	5,5	6,58 – 4,17 = 2,41	4564,3

Apskaičiuojamas vidutinis ultragarso greitis

$$\bar{X} = \frac{\sum_i^n x_i}{n} = 3783,23 \text{ m/s}$$

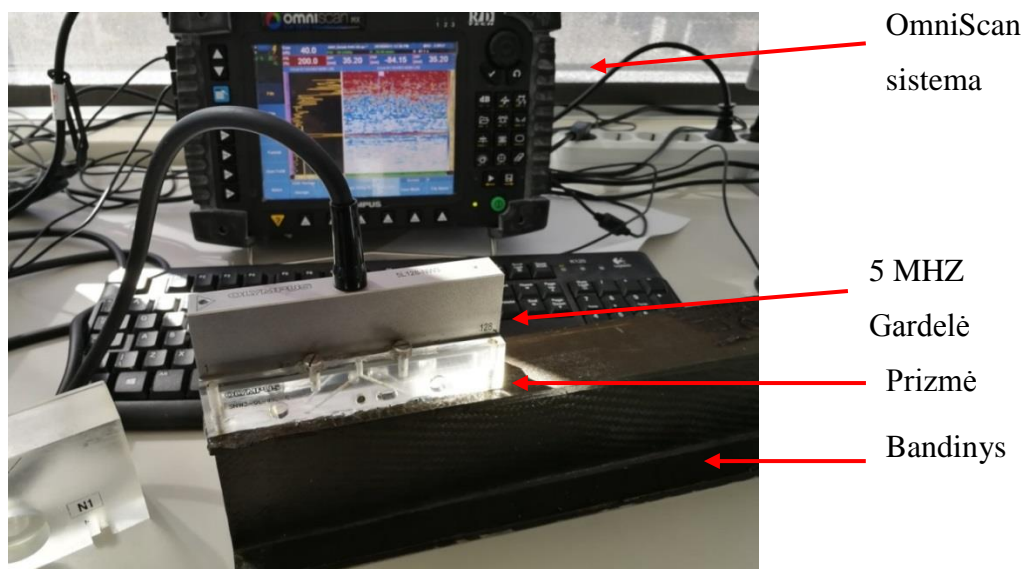
Apskaičiuotas ultragarso greitis bus naudojamas atliekant tolesnius matavimus naudojant gardeles.

3.2. Matavimai su 5 MHz gardele

Atliekamas matavimas su 5 MHz gardele kuri pavaizduota 49 pav. Gardelės parametrai pateikiami 18 lentelėje.

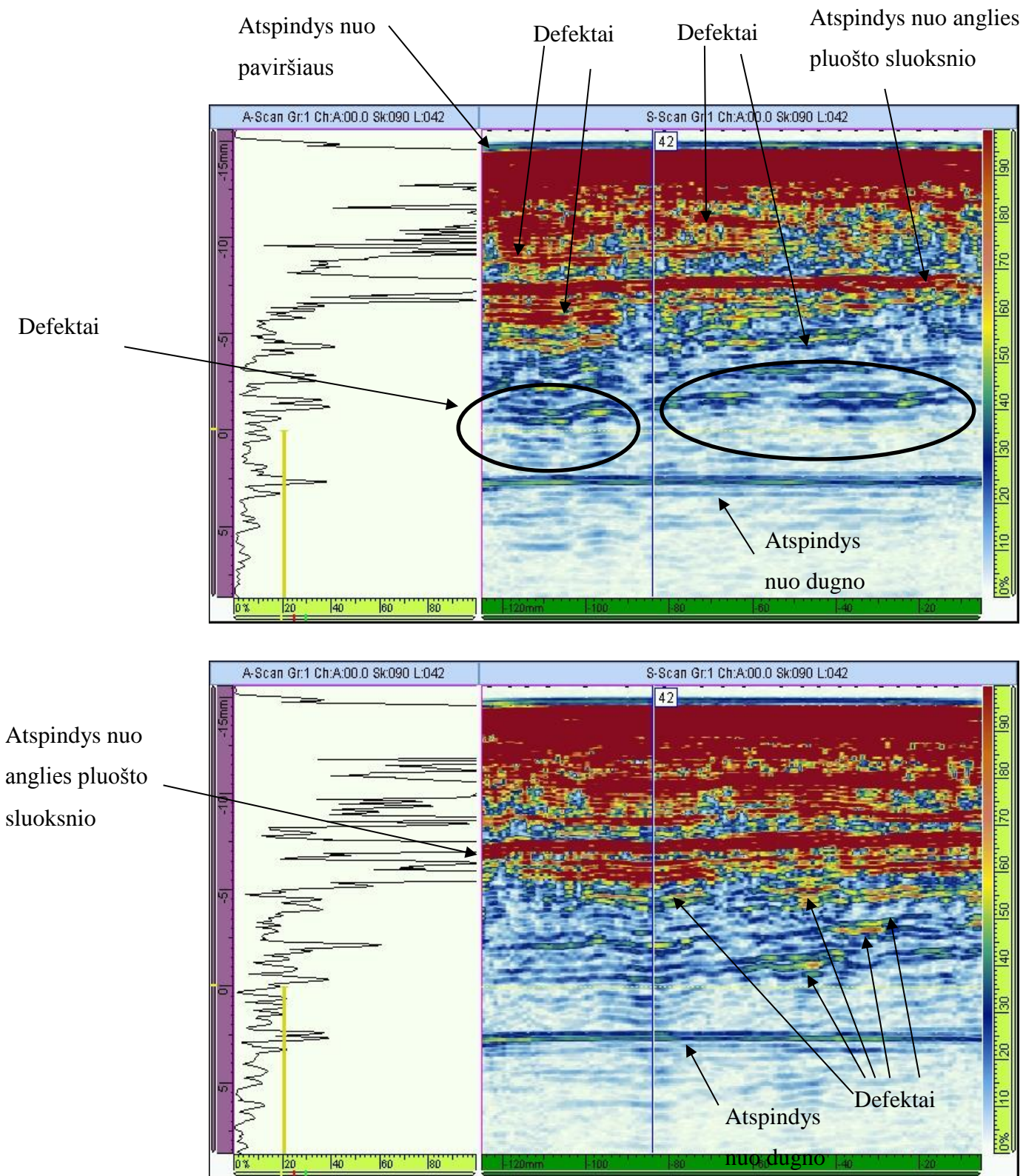
19 lentelė. 5MHz gardelės matavimo parametrai

Ultragarso greitis	3800 m/s
Gardelė	5L128-128x7-NW3-P-2.5-OM 5MHz
Vėlinimo linija (prizmė)	SNW3-0L-IHC-C
Gardelės elementų skaičius	128
Apertūra	8
Dažnis	5 MHz
Stiprinimas	29 dB
Fokusavimo gylis	3mm



49 pav. Matavimas su 5 MHz gardele

Kaip ir kompiuterinės simuliacijos metu, taip ir realiame eksperimente signalas fokusuojamas 3 mm gylyje. Dėl sudėtingos gaminio geometrijos, keičiantis pluošto kryptiai, defektai linkę atsirasti būtent šiame gylyje. Gauti S ir A tipo vaizdai pateikiami paveiksluose žemiau. Naudojant 5MHz gardelę gaunamuose vaizduose galima matyti atspindžius nuo paviršiaus, dugno, atskirų sluoksnių ir defektų.



50 pav. A ir S tipo vaizdai su 5 MHz gardele

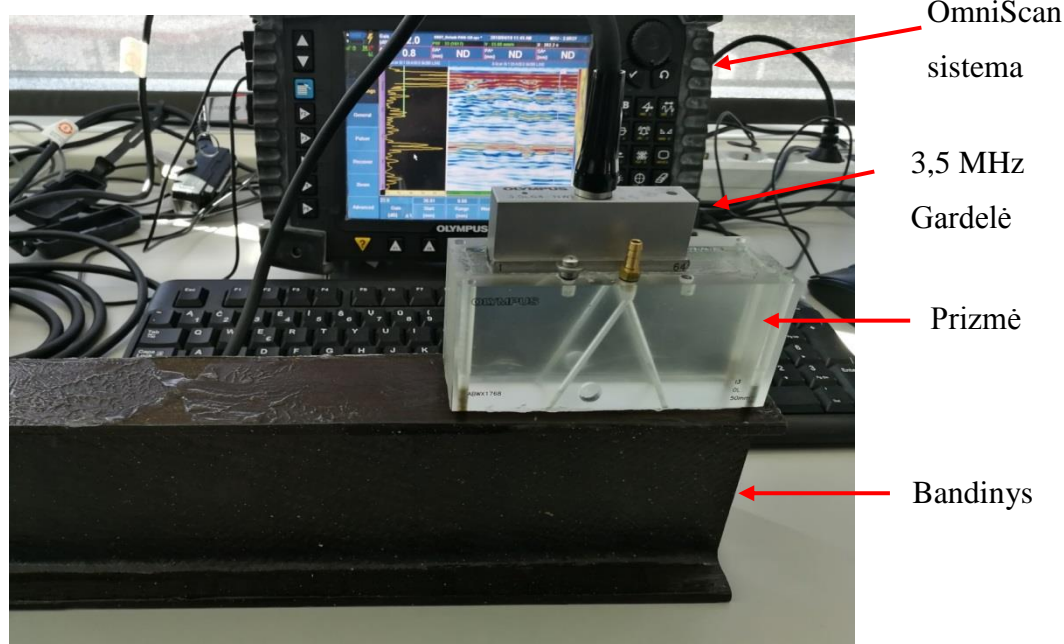
Dėl aukštesnio gardelės dažnio ir sudėtingos daugiasluoksnės bandinio struktūros matomi ne tik atspindžiai nuo atskirų sluoksnių ir defektų, bet ir labai dideli triukšmai dėl bandinio struktūros. Dėl šių priežasčių realių defektų išskyrimas yra gana sudėtingas.

3.3. Matavimai 3,5 MHz gardele

Atliekamas matavimas su 3,5 MHz gardele, kuri pavaizduota 51 pav. Gardelės parametrai pateikiami 19 lentelėje.

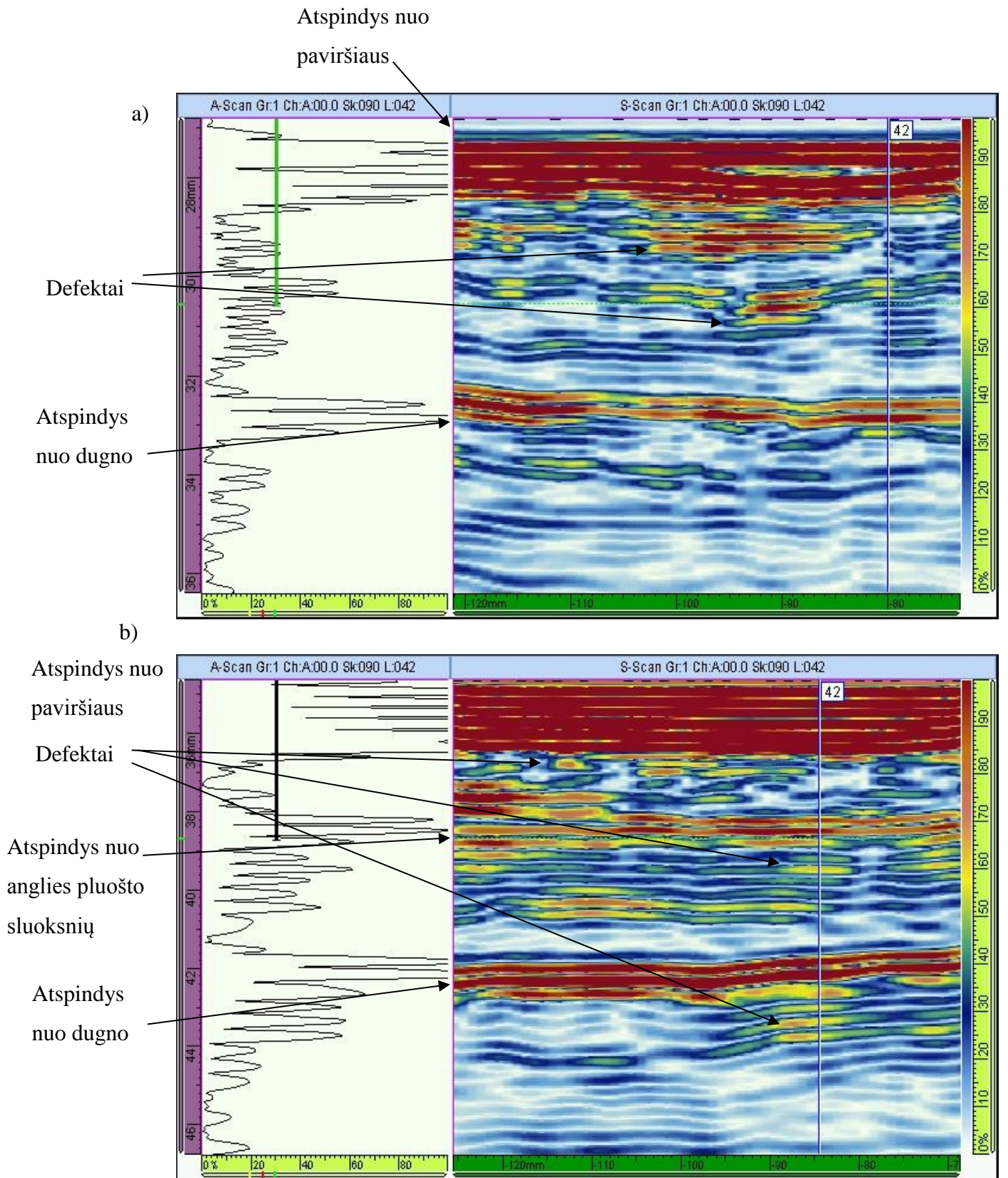
20 lentelė. 5MHz gardelės matavimo parametrai

Ultragarso greitis	3800 m/s
Gardelė	3.5L64-64x7-NW1-P-2.5-OM
Vėlinimo linija (prizmė)	AWBX1768
Gardelės elementų skaičius	64
Apertūra	7
Dažnis	3,5 MHz
Stiprinimas	24 dB
Fokusavimo gylis	3mm

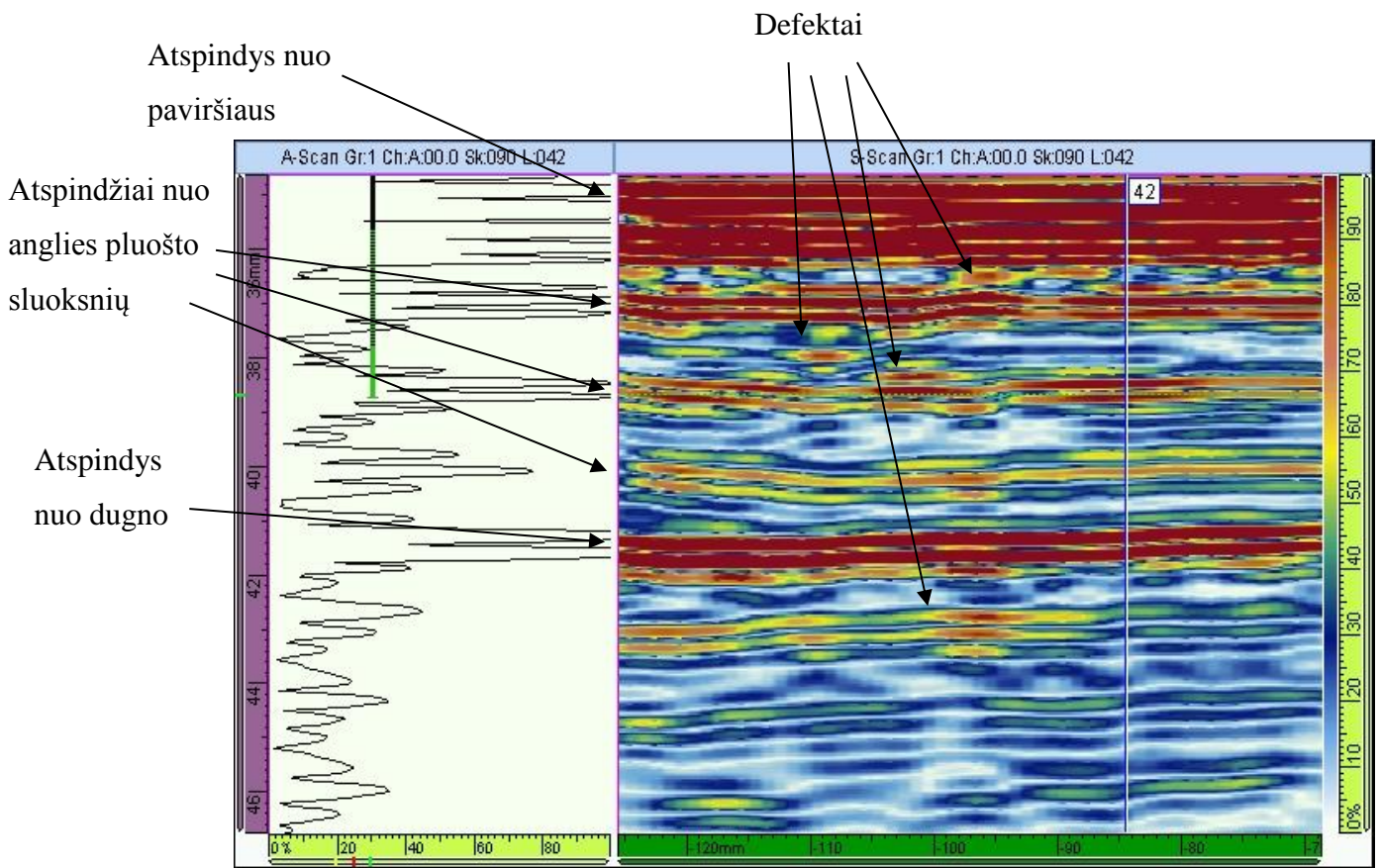


51 pav. Matavimas su 3,5 MHz gardele

Signalas fokusuojamas 3 mm gylyje. Gauti S ir A tipo vaizdai pateikiami paveiksluose žemiau. Naudojant 3,5 MHz gardelę gaunamuose vaizduose taip pat galima matyti atspindžius nuo paviršiaus, dugno, atskirų sluoksnių ir defektų.



52 pav. A ir S tipo vaizdai su 3,5 MHz gardele



53 pav. A ir S tipo vaizdai su 3,5 MHz gardele

53 pav. labai aiškiai matomi atspindžiai nuo visų bandinio sluoksnių. Dėl mažesnio gardelės dažnio struktūros triukšmai ne tokie dideli, todėl lengviau išskirti defektus nuo struktūros.

3.4. Apibendrinimas

Išanalizavus eksperimentinius rezultatus, gautus tiriant bandinį su skirtingo dažnio gardelėmis, nustatyta, kad 3,5 MHz gardelė tinkamesnė sudėtingos geometrijos komponentų iš anglies pluošto pagaminimo kokybės nustatymui. 5 MHz gardele sudėtinga aptikti defektus dėl blogesnio signalas/triukšmas santykio. Tuo tarpu naudojant 3,5 MHz gardelę lengviau išskirti defektuotas zonas.

Išvados

1. Atlikus neardomosios kontrolės metodų analizę nustatyta, kad geriausiai tinkantys metodai sudėtingos geometrijos kompozitinių detalių kokybei tirti yra kompiuterinė tomografija ir ultragarasas. Ultragarso metodas tinkamesnis, kai bandinius reikia tirti gamybinėmis sąlygomis, nes metodo įranga daug paprastesnė ir rezultatai gaunami greičiau.
2. CIVA aplinkoje sukurtas kompiuterinis eksperimento modelis ir atlikta kompiuterinė matavimo simuliacija. Remiantis CIVA rezultatais padaryta išvada, kad realiam eksperimentui atlikti labiau tinka 3,5 MHz ir 5MHz fazuotas gardeles, o ne įprastai aviacijoje naudojami 5MHz vienaelementiniai keitikliai.
3. Remiantis CIVA rezultatais nustatyti gardelių parametrai realiam eksperimentui atlikti: gardelės dažniai 3,5 MHz ir 5 MHz, fokusavimo gylis 3 mm, reikalinga vėlinimo linija (prizmė). Žemesnio dažnio keitikliai naudojami dėl mažesnio ultragarso signalo slopinimo. Vėlinimo linija naudojama tam, kad atliekant plonų gaminių kontrolę, būtų lengviau analizuoti priimtus signalus, kai keitiklis ar gardelė naudojami ir signalų siuntimui ir priėmimui.
4. Eksperimentiškai patikrinus kompiuteriniu modeliavimu gautus rezultatus nustatyta, kad atliekant realų matavimą 3,5 MHz gardelė tinkamesnė sudėtingos geometrijos komponentų iš anglies pluošto pagaminimo kokybės nustatymui. 5 MHz gardele sudėtinga aptikti defektus dėl blogesnio signalas/triukšmas santykio.
5. Naudojant ultragarso metodą su fokusuota 3,5 MHz gardele galima atlikti matavimus gamybinėmis sąlygomis ir taip užtikrinti geresnę aviacijoje naudojamų kompozitinių gaminių kokybę.

Literatūros sąrašas

1. ISHII, Y., BIWA, S., KURASHI, A. Influence of porosity on ultrasonic wave velocity, attenuation and interlaminar interface echoes in composite laminates: Finite element simulations and measurements. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2016, 152, 645–653, [žiūrėta 2018-04-26] ISSN 0263-8223. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.054>
2. HSU, D.K., JEONG, H. Ultrasonic Velocity Change and Dispersion Due to Porosity in Composite Laminates. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* [interaktyvus]. 1989, 1567-1573 [žiūrėta 2018-03-18] ISBN 978-1-4613-0817-1. Prieiga per doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0817-1_197
3. CILIBERTO, A., CAVACCINI, G., SALVETTI, O., CHIMENTI, M., AZZARELLI, L., BISON P.G., MARINETTI, S., FREDI, A., GRINZATO, E. Porosity detection in composite aeronautical structures. *Infrared Physics & Technology*, 2002, 43,(3-5), 139-143. [žiūrėta 2018-02-22] ISSN 1350-4495. Prieiga per doi: [https://doi.org/10.1016/S1350-4495\(02\)00132-9](https://doi.org/10.1016/S1350-4495(02)00132-9)
4. LIU, ZHANG, WANG, & WU. Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates. *Composite Structures*, 2006, 73(3), 303-309. [žiūrėta 2018-02-22] ISSN 0263-8223. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.02.001>
5. Prof. Virginija Jankausaitė, Polimerinės matricos kompozitų gamybos metodai. KTU skaidrės
6. JASIŪNIENĖ, E. (2012). *Ultragarsinė medžiagotyra (elektroninis išteklius): Mokomoji knyga* (1-a laida. ed.). Kaunas: Vitae Litera [i.e. Technologija]. [žiūrėta 2018-03-24]. Prieiga per internetą <https://www.ebooks.ktu.lt/einfo/366/ultragarsine-medziagotyra/>
7. KAŽYS, R. J., RAIŠUTIS, R., ŽUKAUSKAS, E., MAŽEIKA, L., & VLADIŠAUSKAS, A. Air-coupled ultrasonic testing of CFRP rods by means of guided waves. *Physics Procedia*, 2010, 3(1), 185-192. [žiūrėta 2018-03-21] ISSN 1875-3892. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.01.026>
8. KITE, A. H. (2007). Nondestructive evaluation of a carbon fiber wing spar using air-coupled ultrasound. *Retrospective Theses and Dissertations*, 2007, 15041. [žiūrėta 2018-03-20]. ISBN 9780549141594. Prieiga per: <https://lib.dr.iastate.edu/rtd/15041>
9. Ultrasonic testing with civa [interaktyvus]. 2018 Prieiga per: <http://www.extende.com/ultrasonic-testing-with-civa>
10. JASIŪNIENĖ, Elena., ŽUKAUSKAS, Egidijus., SAMAITIS, Vyktas. *Ultragarsinių matavimų laboratoriniai darbai: mokomoji knyga* [interaktyvus]. Kaunas: Technologija, 2013 [žiūrėta 2018-04-15]. ISBN 978-609-02-0834-2. Prieiga per:

<https://www.ebooks.ktu.lt/einfo/1046/ultragarsiniu-matavimu-laboratoriniai-darbai>

11. KRAUTKRÄMER J., KRAUTKRÄMER H. The Pulse-Echo Method; Design and Performance of a Pulse-Echo Flaw Detector. *Ultrasonic Testing of Materials* [interaktyvus]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1990. [žiūrėta 2018-03-20]. ISBN 978-3-662-10680-8. Prieiga per doi: https://doi.org/10.1007/978-3-662-10680-8_11
12. Airbus A320 Non Destructive testing manual [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-00-00]. Prieiga per: www.airbusworld.com
13. HOSSEINI, S. M. H., HECKEL, T., BOEHM, R., BRACKROCK, D., GOHLKE, D., RIEMER, S., and GAAL, M. Comparison of performance of different ultrasonic systems for inspection of CFRP plates. *Conference: Conference: Seminar des FA Ultraschallprüfung, At Saarbrücken*, 2015. [žiūrėta 2018-04-04] Prieiga per: <http://www.ndt.net/article/dgzfp-ut-2015/papers/3.pdf>
14. HILLGER, W., DLR and Ing. Büro Dr. HILLGER, Braunschweig, S. Elze. *Determination of porosity in aerospace structures by ultrasonic pulse echo technique* [interaktyvus] Germany, Bremen: Airbus, 2002, 7(10) [žiūrėta 2018-04-04]. Prieiga per: <http://www.ndt.net/article/ecndt02/143/143.htm>
15. YANG, C., CHEN, Y., WANG, Z., & ZHENG, H. Ultrasonic pulse signal resonance features in layered CFRP within voids. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2017, 32(3), 695-702 [žiūrėta 2018-04-16]. ISSN 1993-0437. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1007/s11595-017-1654-2>
16. KOMMAREDDY, V., PETERS, J. J., DAYAL, V., and HSU, D. K. Air-Coupled Ultrasonic Measurements in Composites. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 700, 859 [žiūrėta 2018-04-15]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1063/1.1711709>
17. NEUENSCHWANDER, J., FURRER, R. and ROEMMELER, A. Application of air-coupled ultrasonics for the characterization of polymer and polymer-matrix composite samples. *Polymer Testing*, 2016, 56, 379-386. [žiūrėta 2018-04-15] ISSN 0142-9418. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.11.002>
18. RUBIN, A., JERINA, K. Evaluation of porosity in composite aircraft structures. *Mechanics of Composite Materials*, 1994, 30(6), 587-600 [žiūrėta 2018-04-05]. ISSN: 1573-8922 Prieiga per doi: [https://doi.org/10.1016/0961-9526\(93\)90085-X](https://doi.org/10.1016/0961-9526(93)90085-X)
19. STAMOPOULOS, A., TSERPES, K., PRUCHA, P., & VAVRIK, D. Evaluation of porosity effects on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced plastic unidirectional laminates by X-ray computed tomography and mechanical testing. *Journal of Composite Materials*, 2016, 50(15), 2087-2098. [žiūrėta 2018-05-02] ISSN 153-793X. Prieiga per: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0021998315602049?journalCode=jcma>

20. YANG, P., & EL-HAJJAR, R. Porosity Content Evaluation in Carbon-Fiber/Epoxy Composites Using X-Ray Computed Tomography. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2013, 53(3), 217-222. [žiūrēta 2018-00-00] ISSN 1525-6111. Prieiga per: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0021998315602049?journalCode=jcma>
21. RAU, E., GRAUVOGL, E., MANZKE, H., EADS, M., and CYR, P. Ultrasonic phased array testing of complex aircraft structures. *In ECNDT*, 2006. [žiūrēta 2018-00-00]. Prieiga per: <https://pdfs.semanticscholar.org/6f9d/e64f4aa8065662472abd96ba3c216ae980d3.pdf>
22. OmniScan MX with ECA/ECT Modules Discover Eddy Current Color Imaging [interaktyvus] 2013 [žiūrēta 2018-05-08]. Prieiga per: <https://www.atecorp.com/ATECorp/media/pdfs/data-sheets/Olympus-OmniScan-MX-Brochure.pdf>
23. HSU, D. Non-destructive evaluation (NDE) of aerospace composites: Ultrasonic techniques- 15. *Non-destructive evaluation (NDE) of polymer matrix composites*, 2013, 397-422. [žiūrēta 2018-05-08] ISBN 978-0-85709-355-4. Prieiga per: <https://www.elsevier.com/books/non-destructive-evaluation-nde-of-polymer-matrix-composites/karbhari/978-0-85709-344-8>
24. OKAHARA, T., BIWA, S., KURAIISHI, A. Nondestructive Evaluation of Porosity Content in the Curved Corner Section of Composite Laminates Using Focused Ultrasonic Waves. ASME. *ASME J Nondestructive Evaluation*, 2017, 1(1). [žiūrēta 2018-05-08] Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1115/1.4037546>
25. DOMINGUEZ, N., MASCARO, B. Ultrasonic Non-Destructive Inspection of Localised Porosity in Composite Materials. *ECNDT*. France, Toulouse: Airbus, 2006 [žiūrēta 2018-05-10]. Prieiga per: <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.2.1.4.pdf>