



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Defekto aptikimo tikimybės analizė klijuotuose sujungimuose taikant neardomąją kontrolę

Baigiamasis magistro projektas

Joana Janeikaitė

Projekto autorė

Prof. Elena Jasiūnienė

Vadovė

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Defekto aptikimo tikimybės analizė klijuotuose sujungimuose taikant neardomąją kontrolę

Baigiamasis magistro projektas
Aeronautikos inžinerija (6211EX024)

Joana Janeikaitė

Projekto autorė

Prof. Elena Jasiūnienė

Vadovė

Doc. Kęstutis Vaitasius

Recenzentas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Joana Janeikaitė

Defekto aptikimo tikimybės analizė klijuotuose sujungimuose taikant neardomąją kontrolę

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Joana Janeikaitė

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Joana Janeikaitė

1. Projekto tema

Defekto aptikimo tikimybės analizė klijuotuose sujungimuose taikant neardomąją kontrolę

(Lietuvių kalba)

Analysis of Defect Detection Probability in The Adhesive Bonds Using Non-Destructive Testing

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: nustatyti defekto aptikimo tikimybę klijuotuose sujungimuose taikant neardomuosius bandymus.

Uždaviniai:

1. apžvelgti šiuo metu naudojamus neardomosios kontrolės tyrimų metodus, taikomus klijuotiems sujungimams, bei tokių metodų privalumus ir trūkumus;
2. sukurti kompiuterinį dviejų suklijuotų aliuminio lydinio plokštelių modelį su defektais klijų sluoksnyje CIVA 2021 programinėje aplinkoje;
3. nustatyti tyrimo parametrus, kurie turi didžiausią įtaką defekto aptikimui;
4. įvertinti defektų aptikimo tikimybę klijuotuose sujungimuose.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Įvertinti defektų aptikimo tikimybę klijuotoje 280 mm ilgio ir 25 mm pločio klijuotų aliuminio lydinio plokščių struktūroje, kai klijų sluoksnio storis 0,16 mm. Ultragarsinio keitiklio dažnis 15 MHz. Įvertinti parametrus, turinčius didžiausią įtaką defekto aptikimui.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma.

Projekto autorė

Joana Janeikaitė

2025-02-15

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Projekto vadovė

Elena Jasiūnienė

2025-02-15

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Krypties studijų
programų vadovas

Prof. Artūras Keršys

2025-02-15

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Janeikaitė, Joana. Defekto aptikimo tikimybės analizė klijuotuose sujungimuose taikant neardomąją kontrolę. Magistro baigiamasis projektas / vadovė prof. Elena Jasiūnienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: neardomoji kontrolė, ultragarsinis tyrimas, defekto aptikimo tikimybė, jautrumas, klijuota jungtis.

Kaunas, 2025. 52 p.

Santrauka

Šiame projekte yra tiriama defekto aptikimo tikimybė klijų sluoksnyje bei nustatomi ir tiriami parametrai, kurie daro įtaką defekto aptikimo tikimybei. Tyrimas atliekamas *CIVA 2021* programine įranga. Tyrimo metu yra tiriami suklijuoti sujungimai, naudojant 2024 aliuminio lydinio plokšteles. Šios dvi 1,8 mm storio plokštelės yra sujungtos klijų sluoksniu, kurio storis yra 0,16 mm. Svarbu tai, kad dėl programinės įrangos skaičiavimų tikslumo ir greitumo, modeliuojama tik klijuotoji jungtis, kurios plotis yra 25 mm, o ilgis – 280 mm. Klijuotoje jungtyje modeliuojami 9 trijų skirtingų dydžių kvadrato formos defektai, kurių kraštinių ilgiai yra: 5 mm, 10 mm ir 15 mm. Pozicionuojama po vieną skirtingo dydžio defektą skirtinguose gyliuose: 1,8 mm, 1,88 mm ir 1,96 mm. Tyrimas atliekamas nekontaktiniu imersiniu aido impulso ultragarsiniu metodu. Vadinasi, bandinys ir keitiklis yra panardinami į vandens talpą. Atliekamas kompiuterinis 15 MHz dažnio fokusuoto ir nefokusuoto keitiklių, kurių skersmuo lygus 10 mm, palyginimo tyrimas, kurio metu nustatoma, kad fokusuoto keitiklio naudojimas užtikrina, kad ultragarso signalas atsispindės nuo defekto, o ne nuo pašalinių paviršių. Kompiuterinio modeliavimo rezultatai patvirtinami, atliekant eksperimentinį bandymą. Eksperimentinis bandymas atliekamas naudojant fokusuotą *Olympus V328-SU-F* keitiklį. Sudaromas skaičiavimams reikalingas kompiuterinis metamodelis, kurį sudaro 1000 skirtingų skaičiuojamųjų kombinacijų. Toliau atliekamas kompiuterinis fokusuoto keitiklio jautrumo tyrimas, kai keičiami įvairūs parametrai, pvz., bandinio sluoksnių storiai, defekto dydis, jo padėtis gylyje, ir taip įvertinama, kad didžiausią įtaką defektui aptikti turi defekto dydis ir keitiklio padėtis bandinio atžvilgiu. Jautrumo nustatymo skaičiavimai yra atliekami, taikant Sobolio indeksų ir Krigingo interpoliacijos metodus. Gauta, kad tyrimai, atliekami nefokusuotu ir fokusuotu keitikliais, yra jautriausi defekto dydžiui ir keitiklio padėčiai bandinio x koordinatės ašies atžvilgiu. Tačiau pastebėta, kad, naudojant nefokusuotą signalą, padidėja tyrimo jautrumas keitiklio pastatymo kampui. Taip pat atliekama defekto aptikimo tikimybės analizė, taikant Monte Karlo metodą. Analizuojama 90 % defekto aptikimo tikimybė su 95 % patikimumo riba, naudojant skirtingo tipo keitikius. Pastebėta, kad atliekant tyrimą su nefokusuoto tipo keitikliu, nėra pasiekama 90 % tikimybė aptikti defektą. Naudojant fokusuoto tipo keitiklį ši tikimybė pasiekama, kai defektas nėra mažesnis už 3,57 mm, o su 95 % patikimumo riba yra aptinkami defektai, kurie nėra mažesni už 4,28 mm.

Janeikaitė, Joana. Analysis of Defect Detection Probability in The Adhesive Bonds Using Non-Destructive Testing. Masters's Final Degree Project / supervisor prof. Elena Jasiūnienė; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: Non-Destructive Testing, Ultrasonic Testing, Probability of Detection, Sensitivity, Adhesive Bonding,

Kaunas, 2025. 52.

Summary

This project investigates probability of defect detection in the adhesive layer and identifies and investigates the parameters that affect the probability of detecting a defect. The *CIVA 2021* software is used to create a model and study a bonded joint made from 2024 aluminium alloy plates. These two 1.8 mm thick plates are connected by an adhesive layer with a thickness of 0.16 mm. Importantly, due to the accuracy and speed of the software calculations, only the bonded joint, which is 25 mm wide and 280 mm long, is modelled. In the bonded joint, 9 square defects of three different sizes are modelled, with side lengths of: 5 mm, 10 mm, 15 mm. One defect of each size is positioned at different depths: 1,8 mm, 1,88 mm, 1,96 mm. The study is performed using a non-contact ultrasonic method. This means that the sample and transducer are immersed in a water tank. A computer-based comparison study of focused and unfocused transducers with a frequency of 15 MHz and diameter of 10 mm is performed, during which it is determined that the use of a focused transducer ensures that the signal will be reflected from the defect, and not from neighbour surfaces. The results of create computer model are verified by the experimental test. The experimental test is performed using a focused *Olympus V328-SU-F* transducer. A computer metamodel has been created, which is required for calculations, and consists of 1000 different combinations. Next, a computer-based sensitivity study of the focused transducer is performed, when various parameters such as the thickness of the sample layers, the size of the defect, and its depth position are changed, and it is estimated that the defect size and the position of the transducer have the greatest influence on the defect detectability. Sensitivity study is performed using Sobol indices and Kriging interpolation methods. It was found that both tests are most sensitive to the defect size and the position of the transducer relative to the x-axis of the sample. However, it has been observed that using an unfocused signal increases the sensitivity of the study to the angle of the transducer placement. An analysis of the probability of defect detection is also performed using the Monte Carlo method. The probability of detecting a defect with a 90% probability of 95% confidence limit using different types of transducers is analysed. It was observed that when the study performed with an unfocused transducer, a 90% probability of detecting a defect is not achieved. When using a focused transducer, this probability is achieved when the defect is not smaller than 3,57 mm, and with a 95% confidence limit defects are detected that are not less than 4,28 mm.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas	10
1. Literatūros apžvalga	11
1.1. Medžiagų sujungimo tipai	11
1.2. Defektų tipai klijuotuose sujungimuose	13
1.3. Neardomosios kontrolės pritaikymas klijuotų sujungimų klijų sluoksnio patikrai	14
1.3.1. Akustinės emisijos metodas	14
1.3.2. Ultragarso inspekcija	15
1.3.3. Radiografijos inspekcija	18
1.4. Apibendrinimas	20
2. Tyrimo metodas	21
2.1. Programinė CIVA 2021 aplinka	21
2.2. Bandinys	21
2.3. Imersinis aido impulso metodas	22
2.4. Keitikliai	24
2.4.1. Nefokusuotas keitiklis	25
2.4.2. Fokusuotas keitiklis	26
3. Rezultatai	27
3.1. Kompiuterinis modeliavimas: defektų aptikimas ir vizualizavimas	27
3.1.1. Defektų aptikimas ir vizualizavimas, naudojant nefokusuoto tipo keitiklį	27
3.1.2. Defektų aptikimas ir vizualizavimas, naudojant fokusuoto tipo keitiklį	33
3.2. Eksperimentinis kompiuterinio modelio tinkamumo patvirtinimas	37
3.3. Įtaką defektų aptikimui klijų sluoksnyje turinčių parametrų nustatymas	38
3.4. Defekto aptikimo tikimybė	44
Išvados	48
Literatūros sąrašas	49

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Projekto metu naudojamų medžiagų parametrai [23]	23
2 lentelė. Nefokusuoto keitiklio pagrindiniai parametrai.....	25
3 lentelė. Fokusuoto keitiklio pagrindiniai parametrai	26
4 lentelė. Signalų, atsispindėjusių nuo defektų, amplitudės, kai keitiklis nėra fokusuotas.....	29
5 lentelė. Signalų, atsispindėjusių nuo defektų, amplitudės, kai keitiklis fokusuotas	34
6 lentelė. Tyrimo metu keičiami parametrai	38

Paveikslų sąrašas

1 pav. Detalių jungimo tipai.....	11
2 pav. Tvirtinimo detalė veikiančios tempimo (kairėje) ir kirpimo (dešinėje) jėgos [8]	11
3 pav. Galimi virinimo būdai [10]	12
4 pav. Klijuotą sujungimą veikiančios jėgos [19]	13
5 pav. Galimi detalių sujungimai klijuojant [20]	13
6 pav. Galimi defektai, klijuoto sujungimo klijų sluoksnyje [24]	14
7 pav. Kampinis keitiklis, naudojamas ultragarso inspekcijoje [36]	15
8 pav. Nefokusuoto ir fokusuoto signalo ultragarsiniai keitikliai [37]	16
9 pav. Ultragarso inspekcijos A tipo vaizdas [43]	17
10 pav. Ultragarso inspekcijos B tipo vaizdo padėtis bandinio atžvilgiu [45].....	17
11 pav. Ultragarso inspekcijos C tipo vaizdo padėtis bandinio atžvilgiu [45].....	17
12 pav. Radiografinė inspekcija [51]	19
13 pav. Bandinio aliuminio lydinio plokštelių ir klijų sluoksnio storiai.....	22
14 pav. Defektų išsidėstymas iš viršaus.....	22
15 pav. Defektų išsidėstymas iš šono.....	22
16 pav. Imersinio ultragarsinio tyrimo schema.....	23
17 pav. Keitiklio skenavimo trajektorija bandinio x koordinatės ašies atžvilgiu.....	23
18 pav. Nefokusuoto keitiklio ultragarso bangos akustinis laukas	25
19 pav. Fokusuoto keitiklio ultragarso bangos akustinis laukas	26
20 pav. Skenuotas C tipo vaizdas, kai keitiklis nefokusuotas.....	27
21 pav. Skenuotas B tipo vaizdas, kai keitiklis nefokusuotas.....	28
22 pav. Skenuotas A tipo vaizdas, kai nėra defekto, o keitiklis nefokusuotas.....	29
23 pav. Skenuoti A tipo vaizdai, kai keitiklis nefokusuotas, o defektų dydžiai: (a) 15 mm, (b) 10 mm, (c) 5 mm.	31
24 pav. Skenuoti A tipo vaizdai, kai keitiklis nefokusuotas, o defektų gyliai: (a) 1,8 mm, (b) 1,88 mm, (c) 1,96 mm	32
25 pav. Skenuotas C tipo vaizdas, kai keitiklis fokusuotas	33
26 pav. Skenuotas B tipo vaizdas, kai keitiklis fokusuotas	33
27 pav. Skenuotas A tipo vaizdas, kai nėra defekto, o keitiklis fokusuotas	34
28 pav. Skenuoti A tipo vaizdai, kai keitiklis fokusuotas, o defektų dydžiai: (a) 15 mm, (b) 10 mm, (c) 5 mm	35
29 pav. Skenuoti A vaizdai, kai keitiklis fokusuotas, o defektų gyliai: (a) 1,8 mm, (b) 1,88 mm, (c) 1,96 mm.....	36
30 pav. Skenuotas bandinio C tipo vaizdas: viršuje – eksperimentinis bandymas, apačioje – kompiuterinis modeliavimas	37
31 pav. Skenuotas A tipo vaizdas, kai nėra defekto: kairėje – eksperimentinis bandymas, dešinėje – kompiuterinis modeliavimas	37
32 pav. Skenuotas A tipo vaizdas, kai yra defektas	38
33 pav. Grafikas, vaizduojantis apskaičiuotus variantus, naudojamas metamodeliui sudaryti	39
34 pav. Parametrų įtaka tyrimo jautrumui, kai keitiklis nefokusuotas.....	40
35 pav. Parametrų įtaka tyrimo jautrumui, kai keitiklis fokusuotas	41
36 pav. Paklaidų pasiskirstymas, kai keitiklis nefokusuotas	42
37 pav. Tikrųjų ir prognozuojamų reikšmių palyginimo regresijos grafikas, kai keitiklis nefokusuotas	42

38 pav. Paklaidų pasiskirstymas, kai keitiklis fokusuotas	43
39 pav. Tikrųjų ir prognozuojamų reikšmių palyginimo regresijos grafikas, kai keitiklis fokusuotas	43
40 pav. Defekto aptikimo tikimybės skaičiavimuose naudojami duomenys	44
41 pav. Defekto aptikimo tikimybės kreivė, kai naudojamas nefokusuotas keitiklis	45
42 pav. Defekto aptikimo tikimybės kreivė, kai naudojamas fokusuotas keitiklis	46
43 pav. Defekto aptikimo tikimybės kreivė, kai naudojamas fokusuotas keitiklis	46

Ivadas

Šiais laikais aviacijos ir kosmoso technologijų pramonėse ieškomi įvairūs struktūrų tarpusavio jungimų patobulinimo būdai. Tai daroma tam, kad konstrukcijos būtų lengvos, patikimos, o jungimo technologija paprasta. Vienas iš tokių būdų, kuris leidžia ne tik sumažinti bendrą konstrukcijos masę, bet ir pagerina jos stiprumo charakteristikas, yra klįjavimas. Šis būdas yra ypatingas tuo, kad klįjuoti sujungimai gali būti taikomi, kai norima sujungti ne tik vienodų, bet ir skirtingų medžiagų detales. Tokiu būdu detalės nėra fiziškai pažeidžiamos, išlaikomas jų vientisumas. Dėl šios priežasties įtempiai pasiskirsto per visą klįjuotą jungimą, nesusidaro įtempių koncentracijos. Nors toks jungimo būdas leidžia tinkamai paskirstyti įtempius, tačiau defektai, pvz., tuštumos, inkluzai, sluoksnių atkibimai, atsiradę klijų sluoksnyje, susilpnina konstrukciją ir ši tampa nepatikima. Tam, kad būtų išvengta tokių pažeidimų, būtina atlikti klįjuotų sujungimų kokybės patikrą.

Tyrimo problema – iki šiol nėra patikimų metodų klįjuotų sujungimų patikrai. Yra atlikti moksliniai tyrimai, kurių metu analizuojama, kokie ultragarsinio tyrimo parametrai padidina tikimybę aptikti defektus [1], kuriais algoritmai, padedantys geriau įvertinti defektų dydžius [2] ir aptikti mažus klįjuotos konstrukcijos pažeidimus [3, 4]. Nors šie moksliniai tyrimai leidžia detaliau analizuoti klįjuotos jungties klijų sluoksniu pažeidimus, tačiau klįjuotų sujungimų defektų aptikimas vis dar išlieka sudėtinga užduotis, reikalaujanti nuolatinių technologinių patobulinimų. Būtina toliau kurti metodus, leidžiančius apdoroti atspindžių signalus, kad būtų sumažinta neteisingų indikacijų tikimybė, bei nustatyti defektų aptikimo tikimybę, kad būtų galima objektyviai įvertinti ultragarsinio tyrimo metodikos patikimumą. Galima teigti, kad pagrindinis ultragarsinių bandymų iššūkis yra kokybiška plonų klįjuotų sujungimų patikra ir mažų matmenų defektų aptikimas.

Klįjuotų jungčių patikros atlikimui tinkamiausia yra naudoti neardomąją kontrolę, nes jos metu klįjuotas sujungimas yra tiriamas jo neišardžius. Galima iškelti hipotezę, kad ultragarsinis tyrimas yra tinkamas metodas struktūros nevientisumo aptikimui, defekto dydžio, vietos bei padėties bandinyje nustatymui. Tokiu būdu būtų galima aptikti net ir smulkius pažeidimus, esančius gilesniuose jungčių sluoksniuose. Siekiant patobulinti šį metodą, reikia nustatyti parametrus, kurie turi įtaką defektui aptikti.

Šiame darbe yra siekiama nustatyti defekto aptikimo klįjuotuose sujungimuose tikimybę. Tai yra svarbu, nes laiku aptikti ir stebimi defektai leidžia išlaikyti konstrukcijos efektyvumą, saugumą, vientisumą. Dėl šios priežasties, naudojamas neardomosios kontrolės metodas turi būti jautres medžiagų pakitimams struktūroje bei užtikrinti defekto aptikimo tikimybę įvairiomis sąlygomis. Todėl šio darbo metu yra tirama, kokie veiksniai daro didžiausią įtaką defekto aptikimui, kad būtų užtikrinamas konstrukcijų ilgaamžiškumas.

Šio baigiamojo magistro projekto tikslas – nustatyti defektų aptikimo tikimybę klįjuotuose sujungimuose taikant ultragarsinius neardomuosius bandymus.

Tam, kad šis tikslas būtų pasiektas, iškeliami uždaviniai:

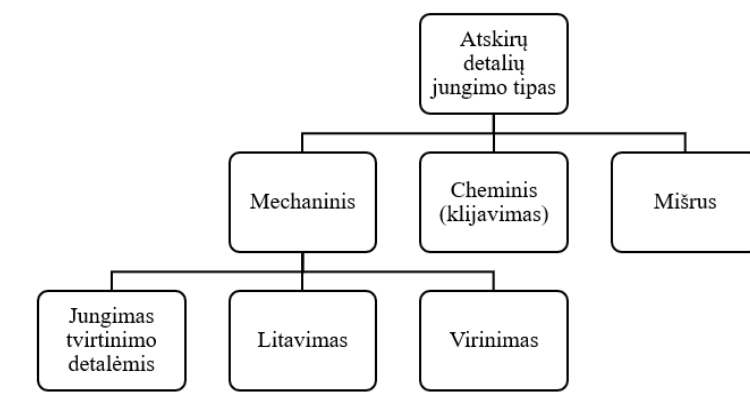
1. apžvelgti šiuo metu naudojamus neardomosios kontrolės tyrimų metodus, taikomus klįjuotiems sujungimams, bei tokių metodų privalumus ir trūkumus;
2. sukurti kompiuterinį dviejų suklįjuotų aliuminio lydinio plokštelių modelį su defektais klijų sluoksnyje CIVA programinėje aplinkoje;
3. nustatyti tyrimo parametrus, kurie turi didžiausią įtaką defekto aptikimui;
4. įvertinti defektų aptikimo tikimybę klįjuotuose sujungimuose.

1. Literatūros apžvalga

Šiame skyriuje yra apžvelgiami detalių jungimo būdai. Aptariama, klijuotų sujungimų privalumai bei trūkumai. Apžvelgiami galimi defektų tipai klijuotuose sujungimuose ir kokiais neardomosios kontrolės būdais juos galima aptikti.

1.1. Medžiagų sujungimo tipai

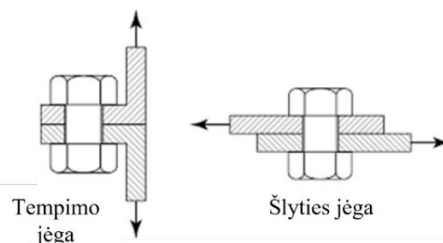
Naudojant įvairius detalių jungimo būdus, galima nejudinamai sujungti kelias detales į vieną nejudinamą detalę. Tai galima padaryti jas jungiant mechaniškai, chemiškai bei mišriai, kai naudojami abu jungimo būdai. 1 paveiksle yra pavaizduoti galimi detalių sujungimo tipai [5].



1 pav. Detalių jungimo tipai

Mechaninis jungimo tipas yra populiariausias būdas sujungti atskiras detales į vieną. Taip yra todėl, nes toks sujungimo tipas yra patikimas ir pakankamai greitas. Taip pat galima jungti įvairaus dydžio elementus [5]. Tačiau naudojant šį būdą jungiamos medžiagos yra mechaniškai pažeidžiamos. Tai reiškia, kad, norint atlikti jungimą tvirtinimo detalėmis, reikia išgręžti kiaurymes jungiamose detalėse, o tai ne tik susilpnina junginį dėl atsiradusių didesnių įtempių prie kiaurymių, bet ir padidina korozijos atsiradimo tikimybę kiaurymių vietose [6].

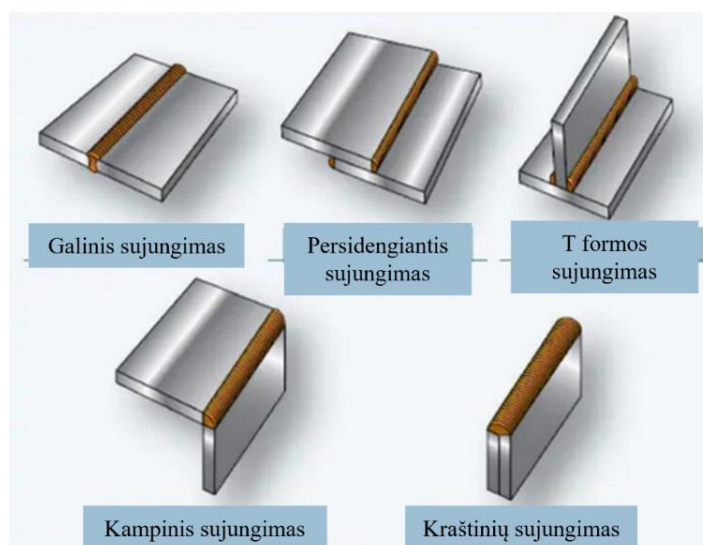
Negana to, tvirtinimo detalės patiria apkrovas (žr. 2 pav.), todėl būtina įvertinti jų gaminių medžiagos leistinus įtempius bei tai, kad eksploataavimo metu jos gali išsisukti bei lūžti nuo nuovargio bei susidariusių įtempių [7].



2 pav. Tvirtinimo detalė veikiančios tempimo (kairėje) ir kirpimo (dešinėje) jėgos [8]

O jungiant detales virinimo būdu, jungiamieji paviršiai yra įkaitinami tiek, kad juos būtų galima sujungti tarpusavyje. Taip pat virinant gali būti naudojama virinimui skirta medžiaga, kurios masė padidina bendrą detalės masę [9].

Tačiau virinimo metodas leidžia atskiras detales sujungti keliais būdais (žr. 3 pav.). Tai reiškia, kad, naudojant tokį sujungimą, galima gauti įvairių formų galutinį gaminį.



3 pav. Galimi virinimo būdai [10]

Tačiau lituojant, detalių medžiagų savybės nėra pakeičiamos, nes proceso metu yra naudojama per žema temperatūra, nes detalės jungiamos išlydant jungiamoms medžiagoms tinkantį lydmetalį. Bet toks jungimo būdas yra tinkamas tik tokioms detalėms, kurios nėra veikiamos didelių apkrovų, todėl labiau tinka elektronikos ar santechnikos įrangoms [11].

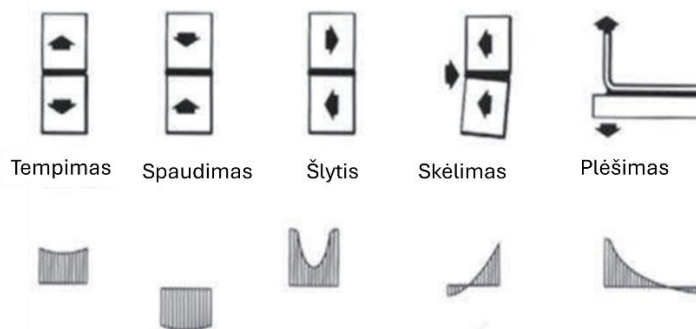
Kai atskiros detalės yra sujungiamos klėjais, tai jų sujungimas yra kljuotas. Klėjai, kuriais sujungiamos detalės, gali būti skysti, pastos konsistencijos arba speciali plėvelė, kuri veikia chemiškai. Dėl kljavimo metu vykstančių cheminių procesų tarp klijų ir kljuojamų detalių, toks sujungimo būdas dar kitaip vadinamas cheminiu detalių sujungimo būdu [12].

Svarbu tai, kad, naudojant šį jungimo būdą, yra būtina tinkamai paruošti kljuojamus paviršius, jog šie būtų švarūs. Tai reikalinga tam, kad būtų sumažinta svetimkūnių patekimo bei nesukibimų tikimybė. Be to, tinkamas paviršių paruošimas ir klijų pasirinkimas neužtikrina, kad kljuota jungtis yra patikima [13].

Detalių, kurios yra sujungtos klėjais, privalumas yra tas, kad jų masė, palyginus su mechaniškai sujungtais komponentais, yra mažesnė. Taip yra todėl, nes klijų tankis yra mažesnis už tvirtinimo detalių, lydmetalio ar virinimo užpildo, todėl ir klijų masė yra mažesnė. Dėl šios priežasties kljuotos jungtys vis dažniau naudojamos aviacijoje, transporto pramonėje, o mažesnė komponentų masė sumažina CO₂ emisiją, nes sumažėja skrydžiui reikalingų degalų kiekis [2, 6, 14].

Be to, kljuotas sujungimas yra pritaikomas ne tik tada, kai norima sujungti vienodų medžiagų pagamintas detales (pvz.: kompozitus su kompozitais, metalais su metalais), bet ir tada, kai detalės yra iš skirtingų medžiagų. Dėl šios priežasties galima sujungti detales, kurios yra pagamintos iš: polimero ir keramikos, keramikos ir metalo, metalo ir polimero. Tačiau sujungti skirtingų medžiagų detales klėjais yra sudėtingiau nei vienodos medžiagos detalės, nes kiekviena medžiaga turi skirtingas fizines savybes ir cheminę struktūrą, todėl reikia tinkamai parinkti medžiagą, su kuria bus suklijuojamos detalės [15].

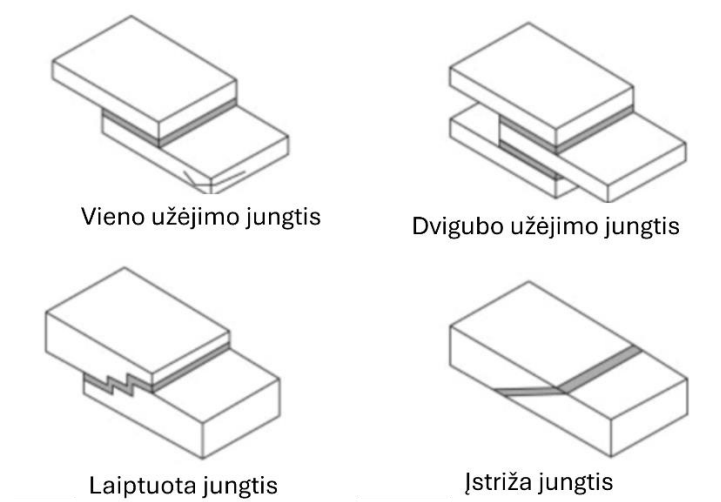
Negana to, klijuojant nėra mechanškai pažeidžiama komponentų struktūra, todėl yra sumažinama tikimybė, kad detalėje atsiras korozija, o detalę veikianti apkrova yra paskirstoma tolygiai per visą klijuotą sujungimą (žr. 4 pav.) [16, 17, 18].



4 pav. Klijuotą sujungimą veikiančios jėgos [19]

Tačiau tokio tipo jungtys yra jautrios vidiniams defektams, kurie atsiranda klijų sluoksnyje. Šie defektai sumažina konstrukcijos patikimumą. Dėl šios priežasties būtina kurti patikimus neardomosios kontrolės metodus klijuotos jungties kokybės įvertinimui [1, 3].

Taip pat egzistuoja įvairūs detalių sujungimo kliais būdai (žr. 5 pav.). Vienas patikimiausių ir efektyviausių kljavimo būdų yra laiptuotas. O daugiausia įtempių susidaro, kai detalės yra klijuojamos įstrižai [20].



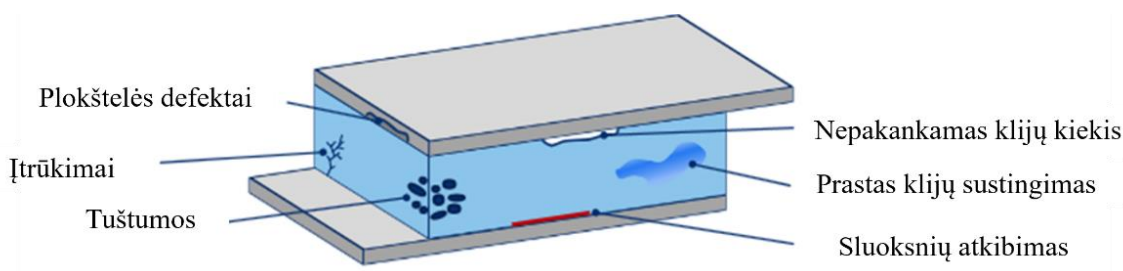
5 pav. Galimi detalių sujungimai klijuojant [20]

Įdomu tai, kad galima vienu metu naudoti ir mechaninius sujungimus varžtais arba kniedėmis, ir kljavimo metodą [21]. Toks sujungimo tipas yra vadinamas mišriu sujungimu. Toks sujungimas yra patvarus dėl tvirtinimo detalių ir standesnis dėl klijuotos jungties [17, 22].

1.2. Defektų tipai klijuotuose sujungimuose

Kadangi klijuotų jungčių klijų sluoksnis yra jautrus struktūriniams pažeidimams, juos būtina laiku identifikuoti. Naudojant neardomosios kontrolės metodus, klijuotų sujungimų klijų sluoksnyje galima

raciti įvairių defektų. Šie defektai gali skirtis dydžiu, orientacija, padėtimi, tipu bei turėti skirtingas atsiradimo priežastis (6 pav.) [23].



6 pav. Galimi defektai, klijuoto sujungimo klijų sluoksnyje [24]

Kiekvienas neardomųjų bandymų metodas, įskaitant ultragarsinį tyrimą, radiografiją, akustinę emisiją, infraraudonųjų spindulių termografiją, sūkurinių srovių tyrimą ir skaitmeninę vaizdų koreliaciją, turi savo privalumų ir trūkumų. Tinkamo bandymo metodo pasirinkimas priklauso nuo įvairių veiksnių, tokių kaip aptinkamo defekto tipas, medžiagos savybės ir tikrinimo reikalavimai [2].

Klijų sluoksnyje, kuris sujungia dvi detales, gali atsirasti įtrūkimai, tuštumos dėl prastai atliktos klijavimo technikos arba dėl tiriamąjį objektą veikiančių apkrovų. Taip pat tam įtakos gali turėti netinkamai išdžiūvęs klijų sluoksnis [23].

Taip pat gali būti aptinkamos sluoksnių atsiskyrimai (atsiklijavimai), kurie atsiranda dėl prastai paruošto detalės paviršiaus. Be to, tokio tipo pažeidimas gali atsirasti ir nuo išorinio veiksnių, pavyzdžiui, jei detalė patyrė smūginę jėgą [23].

Klijuotame sujungime klijų sluoksnyje atsiradę defektai susilpnina jungtį, ji gali tapti neefektyvi, nesaugi naudoti. Dėl to būtina užtikrinti jungties kokybišką patikrinimą, kurio metu būtų nustatoma, ar ji neturi defektų [25]. Sujungimų kokybę galima patikrinti, naudojant tokius neardomosios kontrolės metodus kaip ultragarsinis tyrimas, termografija, radiografija, akustinė emisija [23, 26, 27].

Taigi šiuos defektus galima aptikti naudojant įvairius neardomosios kontrolės metodus.

1.3. Neardomosios kontrolės pritaikymas klijuotų sujungimų klijų sluoksnio patikrai

Neardomoji kontrolė yra naudojama tam, kad būtų užtikrinta klijais sujungtų detalių kokybė ir kad būtų aptinkami defektai. Kadangi tokio patikrinimo metu detalės nereikia išardyti, tai jos konstrukcija lieka nepažeista dėl žmogiškosios klaidos ardymo metu. Svarbu tai, kad klijuotų sujungimų klijų sluoksnio patikrinimui gali būti naudojami keli neardomosios kontrolės metodai: akustinės emisijos, ultragarso, radiografijos, termografijos [28].

1.3.1. Akustinės emisijos metodas

Defektus, atsiradusius klijuoto sujungimo klijų sluoksnyje, galima aptikti realiu laiku taikant akustinės emisijos analizę. Šios analizės metu tiriamasis objektas yra apkraunamas. Ir taip stebima, ar bandinys yra vientisas, o jei aptinkamas defektas, tai yra stebima jo elgsena, progresavimas. Todėl galima teigti, kad šis būdas padeda identifikuoti silpniausias detalės vietas, nustatyti galimas pasekmes [29], [30].

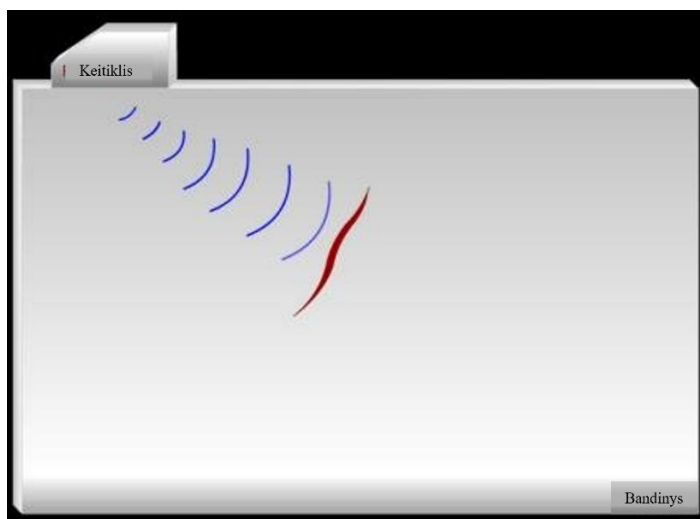
Kadangi akustinės emisijos metodo taikymas leidžia analizuoti tiriamojo objekto vidinę struktūrą be tiesioginio kontakto, tai gali būti patikrinamos ne tik jautrios, bet ir sunkiai pasiekiamos vietos. Tai reiškia, kad defektai yra aptinkami ne tik paviršiuje [29].

Negana to, šis metodas gali būti taikomas kompozitams, metalams, keramikai. Dėl šios priežasties galima teigti, kad toks detalių tyrimo būdas yra universalus ir pritaikomas įvairiose srityse kaip aviacija ar automobilių technologijos [30].

1.3.2. Ultragarso inspekcija

Ultragarso inspekcijos metu defektai yra aptinkami analizuojant atspindžius, kurie atsiranda, kai aukšto dažnio garso bangos perduodamos į bandinį. Tai reiškia, kad aukšto garso bangos, kurias skleidžia keitiklis, atspindi nuo defekto, o atsispindėjusį signalą priima keitiklis ir taip yra fiksuojami atspindžiai. Atlikus atspindžių analizę, galima nustatyti bandinyje esančio defekto dydį, padėtį ir gylį. Šiuo metodu galima ne tik aptikti tokius defektus kaip tuštumos, sluoksnių atsiklijavimai, įtrūkimai, svetimkūniai, bet ir išmatuoti bandinio storį. Taip pat šio tyrimo metu galima nustatyti pačios medžiagos savybes, nes gali būti tiriamos įvairios medžiagos [31, 32, 33, 34].

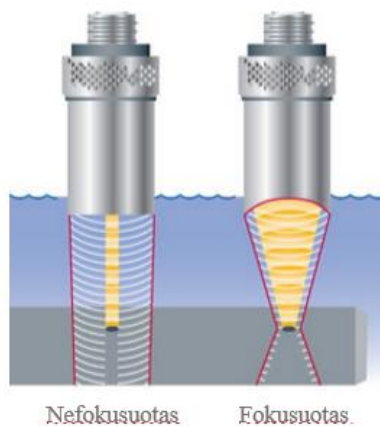
Nors ultragarso metodo tyrimas yra pritaikomas įvairių dydžių, formų bei medžiagų tiriamiesiems objektams, būtina tinkamai parinkti keitiklį. Kadangi defektus sunku aptikti, jei jie yra statmeni objekto paviršiui, tai tokiu atveju reikia naudoti kampinį keitiklį (žr. 7 pav.) [35]. Negana to, dėl signalo atspindžių nuo paviršių, yra sunku interpretuoti rezultatus.



7 pav. Kampinis keitiklis, naudojamas ultragarso inspekcijoje [36]

Taip pat keitikliai gali skirtis fokusavimo tipu. Pagal tai keitikliai yra skirstomi į fokusuoto signalo ir nefokusuoto. Fokusuoto tipo signalas yra skleidžiamas į koncentruotą tašką, o nefokusuoto – į tokį patį paviršiaus plotą, kokio ploto yra keitiklis.

8 pav. yra pavaizduota, kaip atrodo fokusuoto ir nefokusuoto keitiklio skleidžiami signalai.



8 pav. Nefokusuoto ir fokusuoto signalo ultragarsiniai keitikliai [37]

Svarbu tai, kad yra du ultragarsinio tyrimo tipai: kontaktinis ir nekontaktinis. Kontaktinio ultragarso tyrimo metu, keitiklis liečiasi prie bandinio paviršiaus. Tam, kad toks tyrimas būtų tikslus, bandinio paviršius privalo būti švarus bei lygus. Tačiau šios bandinio paviršiaus sąlygos nėra reikalaujamos, jei atliekamas nekontaktinis tyrimas, kurio metu bandinys yra panardinamas į skystą terpę. Bet tokiu atveju reikia užtikrinti, kad tiriamos medžiagos yra atsparios vandeniui, kuris šiame tyrime yra skystoji terpė, per kurią keitiklio skleidžiamas signalas yra perduodamas į bandinį [2].

Negana to, vandens terpė užtikrina didelį signalo jautrumą bei tikslumą. Tai reiškia, kad įvairūs struktūros netolygumai yra efektyviau aptinkami [38].

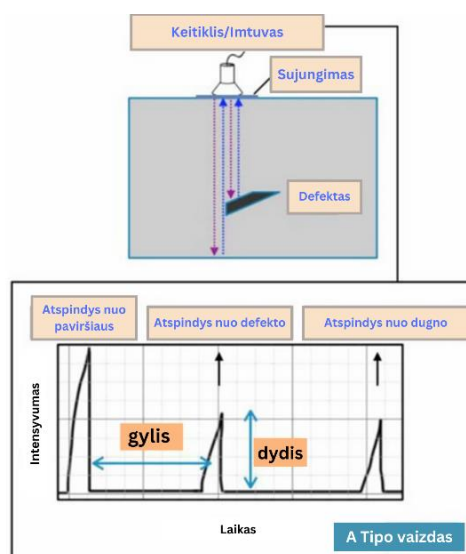
Tačiau nekontaktinis ultragarso tyrimo atlikimas yra sudėtingesnis nei kontaktinis. Taip yra ne tik dėl to, kad medžiagos turi būti nerūdijančios bei nesugėriančios vandens, bet ir dėl įrangos, reikalingos tyrimui atlikti. Nekontaktiniam ultragarso tyrimui yra reikalinga speciali vandeniui pripildyta talpa, kuri yra brangi ir didelė. Taip pat, ne visi objektai gali būti patikrinami šiuo būdu dėl kameros dydžio ribojimų. O kontaktinio ultragarsinio metodo įranga yra nešiojama, todėl galima iškart vietoje ištirti objektus [39].

Taigi imersinis ultragarso tyrimas yra tikslus ir patikimas, nes turi geresnį akustinį sujungimą, kuriuo signalas sklinda nuo keitiklio iki tiriamojo objekto. Tai reiškia, kad signalas sklinda nepertraukiamai, nėra išsklaidomas, todėl gali būti tiriami lenkti bei nelygūs paviršiai. Negana to, gaunami tikslesni matavimo rezultatai, nes vandens terpė sumažina signalo kintamumą [1, 40, 41].

Be to, naudojant šį metodą padidėja tikimybė aptikti detalėje esantį defektą. Taip yra todėl, kad imersinis ultragarso tyrimas yra jautrus, todėl aptinkami ir smulkūs defektai kaip tuštumos, gamybos metu atsiradusios šiukšlės, atsiklijavimai. Todėl galima teigti, kad panardinto bandinio ultragarso tyrimas yra tinkamas norint užtikrinti detales kokybę [39, 42].

Taip pat ultragarsinio tyrimo metu rezultatai gali būti vaizduojami trimis būdais: A tipo vaizdu, B tipo vaizdu, C tipo vaizdu.

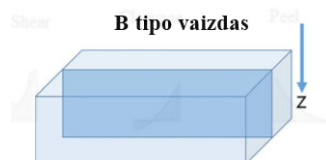
A tipo vaizde (žr. 9 pav.) rezultatai vaizduojami koordinatinių sistemoje, kurioje horizontalioje ašis atitinka laiko pokytį, o vertikalioji – atspindėtojo signalo amplitudę.



9 pav. Ultragarso inspekcijos A tipo vaizdas [43]

Tokio tipo vaizdas leidžia ne tik aptikti defektą, bet ir išmatuoti, kuriame gylyje jis yra arba kokio storio yra tiriamasis objektas [43, 44].

B tipo vaizde (žr. 10 pav.) vaizduojamas tiriamojo objekto šoninis pjūvis. Tai reiškia, kad iš tokio tipo vaizdo galima analizuoti defekto padėtį bandinyje [45].



10 pav. Ultragarso inspekcijos B tipo vaizdo padėtis bandinio atžvilgiu [45]

O C tipo vaizde (žr. 11 pav.) galima matyti, koks yra defektų išsidėstymas iš viršaus. Toks vaizdas leidžia nustatyti defektų dydį bei išsidėstymą [45]. Taigi, naudojant visų tipų vaizdus, galima atlikti išsamią analizę apie tiriamojo objekto vientisumą.



11 pav. Ultragarso inspekcijos C tipo vaizdo padėtis bandinio atžvilgiu [45]

Kadangi ultragarsinio metodo būdu galima aptikti ne tik išorinius defektus, bet ir struktūros viduje esančius defektus, tai šis neardomosios kontrolės metodas yra efektyvus, palaikant struktūros vientisumą. Be to, ultragarsinės bangos gali prasiskverbti per įvairaus tankio medžiagas, todėl šis patikros būdas yra tinkamas įvairioms struktūroms [46, 47].

Šiuo metu yra skiriama daug dėmesio imersinio ultragarsinio tyrimo tobulinimui. Siekiama padidinti ne tik šio metodo tikslumą, bet ir jautrumą, patobulinti vaizdavimo metodus [1, 46]

Pavyzdžiui, tyrėjai D. Smagulova *et al.* analizavo, kokią įtaką defektų aptikimo tikslumui turi ultragarsinio matavimo parametrai: signalo sklidimo laikas, atspindžio amplitudė, dažnis. Atliktas tyrimas parodė, kad yra būtina tobulinti signalų apdorojimo metodus, mažinančius atspindžių persidengimą, kad būtų padidinta defekto aptikimo tikimybė [1].

H. P. Jansen *et al.* tyrė silpnų sukibimų tarp plokštelių aptikimo tikimybę. Šis tyrimas reikalingas, kad būtų aptikti realūs pažeidimai, o ne tik klijų sluoksnio storio pakitimai. Ir nors šio tyrimo metu buvo pastebėti atspindėtų signalų pokyčiai, tačiau ne visais atvejais buvo aptikti defektai, todėl yra būtina tobulinti jų aptikimo tikimybę [3].

Taip pat klijuotos jungties vientisumą tyrė D. Smagulova *et al.* Šie tyrėjai sukūrė naują signalų apdorojimo algoritmą, kuris paremtas signalo sklidimo laiko ir daugkartinių atspindžių analize. Gauta, kad toks algoritmas leidžia aptikti mažus klijų sluoksnio atkibimus, tačiau labai mažų defektų aptikimo tikimybė lieka maža [4].

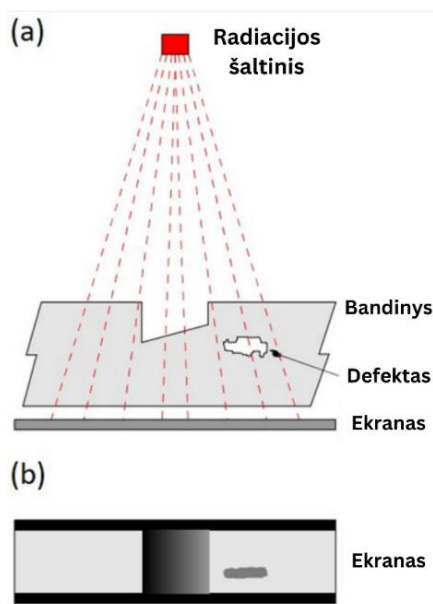
Atliktuose tyrimuose nustatyta, kad ultragarsinio metodo naudojimas leidžia aptikti mažus atkibimus, esančius klijų sluoksnyje, tačiau jis yra jautrus paviršiaus nelygumams, sunku analizuoti atsispindėjusius signalus nuo daugiasluoksnių konstrukcijų ir tikimybė aptikti mažus defektus lieka maža [1, 2, 3, 4, 23].

Apibendrinant galima teigti, kad ultragarso tyrimo metu yra gaunama informacija, kuri leidžia analizuoti ne tik detalių kokybę. Tai reiškia, kad naudojant šį metodą galima aptikti defektus, esančius ne tik ant paviršiaus, bet ir gilesnėje struktūroje. Toks tyrimo būdas leidžia analizuoti defekto dydį, padėtį, orientaciją ir tipą. Negana to, naudojant ultragarsinį tyrimo metodą galima nustatyti bandinio storį, geometrinius parametrus. Taip pat defektų aptikimo tikimybė svarbi, kai norima įvertinti ultragarsinio bandymo metodų patikimumą klijuotų sujungimų kokybės kontrolėje. Kadangi klijuotuose konstrukcijose galimi tokie defektai, kaip atkibimai, įtrūkimai ar silpni sukibimai, kurių neįmanoma identifikuoti vizualiai, būtina įvertinti ultragarsinių technologijų efektyvumą ir tikslumą.

1.3.3. Radiografijos inspekcija

Apšvitinus tiriamąjį objektą Rentgeno spinduliais, gaunama ir analizuojama 2D projekcija (žr. 12 pav.). Tokia inspekcija yra vadinama radiografija. Šio tyrimo metu įtrūkimai, tuštumos, svetimkūniai yra aptinkami, kai Rentgeno spinduliai įsigeria į detalę. Svarbu tai, kad spindulių įsigėrimui įtaką daro objekto apšvitinimo laikas, spinduliuotės įtampa bei srovė. Šiuo būdu galima tirti įvairias medžiagas, tačiau tiriamasis objektas turi tilpti į radiografijos inspekcijai skirtą aparatūrą [48, 49, 50].

Tačiau tiriant objektą radiografijos būdu reikia objektą analizuoti įvairiomis kryptimis. Tai reiškia, kad bandinys turi būti sukamas įvairiomis pusėmis. Tokiu būdu yra aptinkami tokie defektai kaip tuštumos, šiukšlės [2, 27].



12 pav. Radiografinė inspekcija [51]

Galima teigti, kad, naudojant radiografijos būdą, defektą yra sudėtingiau aptikti nei ultragarso inspekcijos metu. Tačiau atliekant radiografiją yra aiškiai matoma defekto forma ir jos padėtis bandinyje, nors tyrimą reikia kartoti daug kartų, nes bandinį reikia sukti įvairiomis kryptimis.

G. A. Bhat *et al.* analizavo ultragarsinių ir rentgeno duomenis. Gauti rezultatai parodė, kad abiejų metodų tyrimų rezultatų sujungimas sumažina matavimo paklaidą, leidžia tiksliau nustatyti defektų dydžius. Tačiau, būtina toliau tobulinti defektų aptikimo tikimybę [2]

O E. Jasiūnienė *et al.* įrodė, kad ultragarsinio metodo taikymas efektyviausiai aptinka sluoksninius defektus, o rentgeno metodas – tūrinius medžiagų pakitimus [23].

Šiais laikais yra stengiamasi pritaikyti radiografinę inspekciją neardomojoje kontrolėje. Kadangi šis būdas nėra kontaktinis, tai reiškia, kad klijuotosios jungtys nėra pažeidžiamos, išlaikomas jų patikimumas. Be to, naudojant šį metodą yra aptinkami klijų storio pokyčiai, tuštumos [23, 27, 52].

Tačiau, kai klijų sluoksnis plonas ar yra stipriai slopinami spinduliai, tampa sudėtinga pastebėti defektus. Taip yra dėl to, kad radiografija yra labiau tinkama tūrinių defektų aptikimui. Todėl būtina taikyti pažangius ir patikimus NDT metodus, kurie leistų aptikti vidinius defektus su dideliu tikslumu [27, 50].

Kadangi kiekvienas neardomosios kontrolės metodas turi specifinį jautrumą skirtingiems defektams, tyrimų metu yra taikomi keli metodai. Taip yra užtikrinamas tyrimų patikimumas ir tikslumas. Pavyzdžiui, ultragarsinio tyrimo metu yra efektyviai aptinkami atsiklijavimai, įtrūkimai, o radiografijos metu geriau aptinkamos tuštumos, tankio pokyčiai. Norint pasiekti tikslius rezultatus, būtina kombinuoti kelis neardomosios kontrolės metodus [27, 53].

Apibendrinant, visų nagrinėtų tyrimų rezultatai rodo, kad siekiant patikimos klijuotų sujungimų diagnostikos būtina derinti ultragarsinį ir rentgeno metodus.

1.4. Apibendrinimas

Nors yra sukurta pažangių ultragarsinių metodų, taikomų klijuotų sujungimų defektų aptikimui, visi analizuoti moksliniai straipsniai parodė, kad šį neardomosios kontrolės metodą vis dar reikia tobulinti, nes jis nėra pakankamai efektyvus visų tipų defektų nustatymui. Sudėtinga aptikti mažus defektus, kurie nesukelia stiprių atspindimo signalo amplitudžių pokyčių, todėl jie lieka neaptinkami. Taip pat nagrinėtuose tyrimuose ištirta, kad ultragarsinis metodas yra jautrus skirtingoms bandinio sluoksnių medžiagoms, nes tai slopina ir iškraipo signalus: nuo defektų atspindėti signalai gali sutapti su atspindžiais nuo bandinio sluoksnių. Dėl tokių veiksnių atsiranda netikslumai, sudėtinga aptikti defektą. Vadinasi, neužtenka vien tik aptikti pažeidimus klijų sluoksnyje, yra būtina nustatyti ultragarsinio metodo gebėjimą aptikti defektus tam tikromis sąlygomis, atlikti defektų aptikimo tikimybės tyrimą. Dėl to šiame darbe yra įvertinami ultragarsinio tyrimo parametrai, kurie turi įtaką defektų aptikimui, nustatomas tyrimo jautrumas bei defektų aptikimo tikimybė.

2. Tyrimo metodas

Konstrukcijose, kurios yra sujungtos klijavimo būdu, defektai dažniausiai yra klijų sluoksnyje. Dėl šios priežasties reikia išsiaiškinti, kokia yra tikimybė aptikti klijų sluoksnyje esančius defektus, taikant neardomąją kontrolę. Šiame darbe, defektų aptikimui yra naudojamas imersinis aido impulsinis ultragarsinis metodas.

Imersinis ultragarsinis tyrimas yra pradedamas nuo kompiuterinio modelio sukūrimo. Tiriamasis bandinys yra suklijuotos aliuminio lydinio plokštelės. Šis modelis yra tiriamas skirtingais keitikliais, t. y. tyrimo metu yra naudojami fokusuotas ir nefokusuotas keitikliai. Šių keitiklių dažnis – 15 MHz. Toks dažnis yra parenkamas todėl, nes, naudojant aukštesnio dažnio keitiklius, gaunama geresnė signalų skiriamoji geba. Kadangi tiriamojo bandinio struktūra yra plona, tai aukštesnio dažnio keitiklis taip pat yra reikalingas tam, kad būtų galima atskirti atspindžius nuo atskirų sluoksnių.

Naudojant nefokusuotą keitiklį, ultragarso banga apspinduliuoja didesnę tiriamąją plotą. Tai reiškia, kad bangos, sklindančios iš keitiklio, apimamas plotas yra didesnis nei keitiklio plotas, nes spinduliuojama banga, toldama nuo keitiklio, skleidžiasi į visas puses. Dėl šios priežasties keitiklis gali priimti ne tik nuo defekto, bet ir nuo aplinkos atsispindėjusį signalą. O naudojant fokusuotą keitiklį ultragarso banga sklinda į vieną tašką. Tai reiškia, kad signalas sklinda tik į konkrečią vietą, į kurią jis yra nukreiptas, todėl negaunamas išorinis signalas.

Svarbu tai, kad tyrimas atliekamas imersiniu būdu. Vadinasi, matavimai atliekami vandenyje. Toks būdas leidžia ultragarso bangoms geriau prasiskverbti per bandinio paviršių, o signalas neišsisklaido.

Kad būtų įsitikinta, ar tinkamai sukurti skaitmeniniai modeliai, atliekamas eksperimentinis bandymas.

Darbo metu yra analizuojamas ultragarso bangos sklidimo laukas tam, kad būtų galima įvertinti, kokio keitiklio naudojimas yra efektyvesnis defektų paieškoje. Taip pat nustatomi parametrai, kurie daro įtaką signalo jautrumui. Be to, įvertinamos defektų aptikimo tikimybės kreivės.

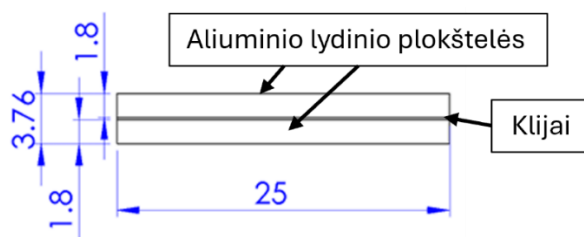
2.1. Programinė CIVA 2021 aplinka

Tyrimas yra atliekamas *CIVA 2021* programine įranga. Šia programine įranga galima atlikti įvairių metodų neardomosios kontrolės tyrimus, pvz., ultragarso, termografijos, radiografijos. Ši programa pasirinkta, nes ja galima atlikti išsamų bandinio ultragarsinį tyrimą. Taip pat galima stebėti aukšto dažnio bangų sklidimo lauką nuo keitiklio iki tiriamojo objekto. Be to, galima stebėti kaip per laiką keičiasi atspindimas signalas bei atlikti tyrimus, kurie padeda nustatyti defekto aptikimo tikimybę ir taip nustatyti ultragarsinio tyrimo kokybę [54].

2.2. Bandinys

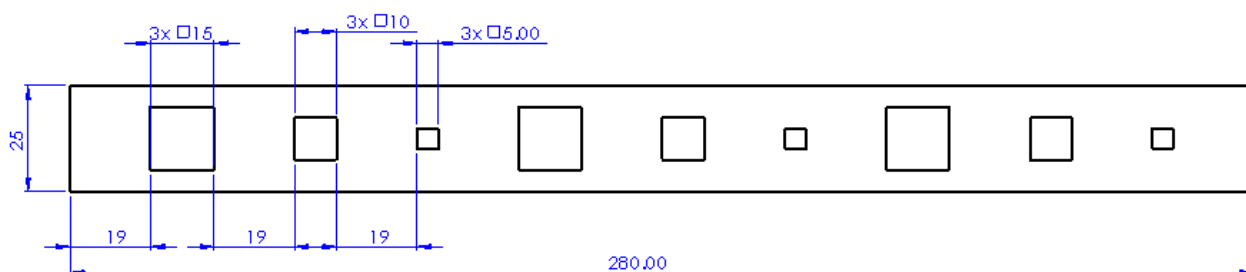
Yra tiriamas bandinys, kurio dvi 1,8 mm storio 2024 aliuminio lydinio plokštelės yra suklijuotos 0,16 mm storio klijų sluoksniu (žr. 13 pav.).

Kadangi tyrimo tikslas yra nustatyti ultragarsinio tyrimo kokybę, ieškant defektų klijų sluoksnyje, tai modeliuojama tik klijuotoji sritis. Šios srities ilgis yra 280 mm, o plotis – 25 mm.



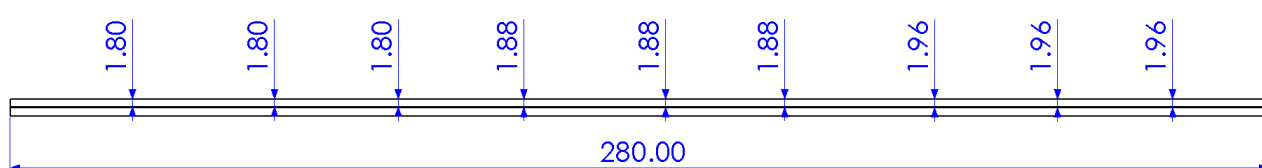
13 pav. Bandinio aliuminio lydinio plokštelių ir klijų sluoksnio storiai

Taip pat klijų sluoksnyje, išlaikant 19 mm atstumą, sudedami kvadrato formos defektai. Be to, defektai yra parenkami trijų skirtingų dydžių: 15 mm, 10 mm bei 5 mm. Taip pat visų defektų simetrijos centrai sutampa su tiriamosios plokštelės simetrijos ašimi. Iš viso klijuotame sujungime yra 9 defektai – po tris kiekvieno dydžio (žr. 14 pav.).



14 pav. Defektų išsidėstymas iš viršaus

Negana to, defektai yra išdėstomi trijuose skirtinguose bandinio gyliuose (1,8 mm, 1,88 mm, 1,96 mm) taip, kad kiekviename gylyje būtų po vieną skirtingo dydžio defektą (žr. 15 pav.). Svarbu tai, kad tokie tiriamieji gyliai yra pasirenkami tam, kad būtų galima ištirti defekto aptikimo tikimybę, kai šis yra klijų sluoksnio viršuje bei apačioje prie pat aliuminio lydinio plokštelės bei klijų sluoksnio viduryje.

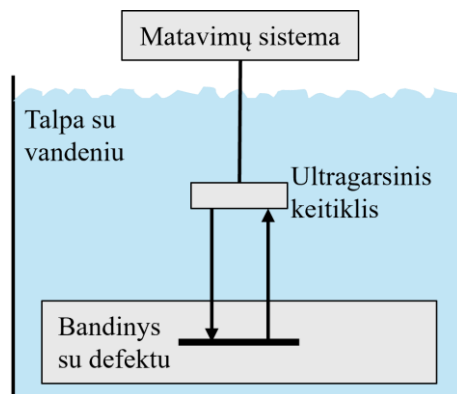


15 pav. Defektų išsidėstymas iš šono

2.3. Imersinis aido impulso metodas

Kadangi atliekamas ultragarso tyrimas yra imersinis, bandinys yra panardinamas skystyje. Todėl skystąją bandymo terpe yra pasirenkamas vanduo, kuris užtikrina nedidelius ultragarso bangos sklaidimo nuostolius ir neiškraipo signalo.

16 pav. yra vaizduojama, kaip atrodo šio tyrimo matavimų schema.



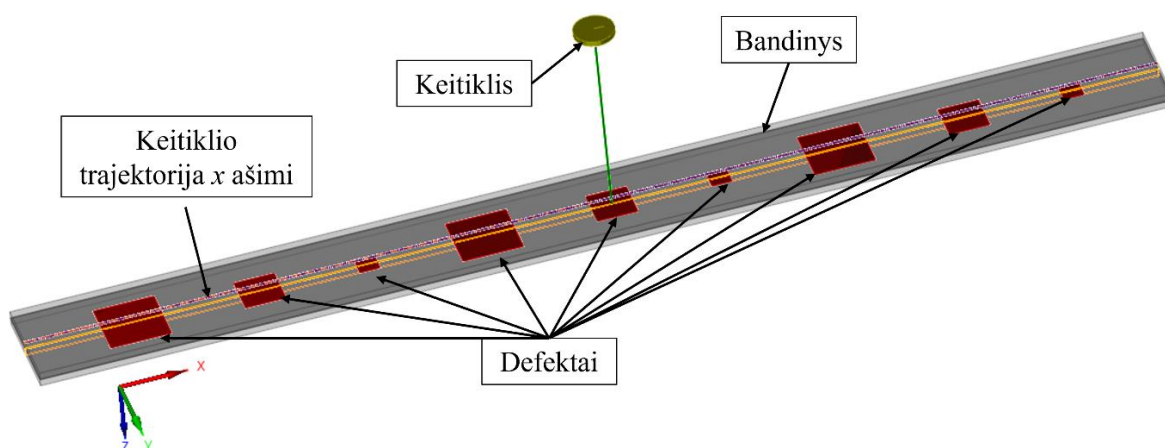
16 pav. Imersinio ultragarsinio tyrimo schema

Kaip matoma, signalas iki defekto sklinda vandens terpe bei pačiu bandiniu. Todėl yra svarbu tinkamai nustatyti ultragarsinio keitiklio parametrus. Tam, kad šie būtų tinkami, reikia žinoti ultragarso bangos sklidimo greitį vandenyje, naudojamuose klijuose bei 2024 aliuminio lydinio plokštelėse. Taip pat reikia žinoti šių medžiagų tankį. Šie reikalingi dydžiai, naudojami tyrime, yra pateikti 1 lentelėje. Žinant šiuos dydžius, galima atlikti imersinius ultragarsinio metodo bandymus ir taip nustatyti šio metodo kokybę, ieškant defektų klijuotuose sujungimuose.

1 lentelė. Projekto metu naudojamų medžiagų parametrai [23]

Medžiaga	Tankis, kg/m^3	Ultragarso bangos sklidimo greitis medžiagoje, m/s
2024 aliuminio lydinys	2780	6363
Klijai	1214	2433
Vanduo	998	1496

Šio imersinio aido impulso ultragarsinio tyrimo metu keitiklis skenuojamas bandinio x koordinatės ašimi (žr. 17 pav.).



17 pav. Keitiklio skenavimo trajektorija bandinio x koordinatės ašies atžvilgiu

Svarbu tai, kad tyrimo metu, kai formuojamas C tipo vaizdas, keitiklis taip pat skenuojamas bandinio y koordinatės ašimi.

2.4. Keitikliai

Kadangi šio darbo tikslas yra išsiaiškinti defektų aptikimo tikimybę, kompiuterinio modelio tyrimas atliekamas su dvejais skirtingais keitikliais. Vienas jų yra nefokusuoto signalo, o kitas – fokusuoto. Šie keitikliai yra vieno elemento, statmeni, o jų skleidžiamo signalo dažnis yra 15 MHz. Toks dažnis pasirenkamas, nes, tiriant mažo storio struktūras, naudojami aukšto dažnio keitikliai. Todėl yra gaunama didesnė skiriamoji geba nei naudojant 5 MHz keitiklį, kuris įprastai naudojamas aviacijoje.

Yra žinoma, kad nuo keitiklio dažnio priklauso, koks mažiausio dydžio defektas gali būti aptiktas. Šis dydis yra lygus skleidžiamo signalo bangos ilgio pusei ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$d = \frac{\lambda}{2}; \quad (1)$$

čia λ – bangos ilgis, m.

Bangos ilgis yra lygus ultragarso signalo sklaidimo greičio medžiagoje ir signalo dažnio santykiui:

$$\lambda = \frac{v}{f}; \quad (2)$$

čia v – ultragarso bangos sklaidimo greitis medžiagoje, m/s; f – keitiklio dažnis.

Taikant formulę (2), apskaičiuojamas teorinis klijuose sklindančios ultragarso bangos ilgis, kai naudojamas įprastas 5 MHz keitiklis:

$$\lambda_{5 \text{ MHz}} = \frac{2433 \text{ m/s}}{5 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 487 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 0,487 \text{ mm}.$$

Pagal formulę (1) apskaičiuojamas mažiausias defekto dydis, kuris gali būti aptiktas klijų sluoksnyje, naudojant keitiklį, kurio dažnis 5 MHz:

$$d_{5 \text{ MHz}} = \frac{0,487 \text{ mm}}{2} = 0,244 \text{ mm}.$$

Atliekamas teorinis ultragarso bangos ilgio skaičiavimas, kai naudojamas 15 MHz dažnio keitiklis:

$$\lambda_{15 \text{ MHz}} = \frac{2433 \text{ m/s}}{15 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 162 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 0,162 \text{ mm}.$$

Gaunamas mažiausio aptinkamo defekto dydis, naudojant 15MHz dažnio keitiklį:

$$d_{15 \text{ MHz}} = \frac{0,162 \text{ mm}}{2} = 0,081 \text{ mm}.$$

Taigi apskaičiuota, kad, naudojant įprastą 5 MHz dažnio keitiklį, teoriškai klijuose galima aptikti nemažesnius už 0,244 mm defektus, o su 15 MHz dažnio keitikliu aptinkami nemažesni už 0,081 mm defektai. Dėl šios priežasties rezultatų skiriamoji geba yra didesnė, kai naudojamas 15 MHz keitiklis. Tačiau šie skaičiavimai yra tik teoriškai aptinkamo defekto dydžio paprastose struktūrose. Klijotų sujungimų struktūra yra sudėtinga, todėl realybėje defekto aptikimui įtakos turi daugiau faktorių,

pvz., signalo slopimas, kai šis pereina atskirus sluoksnius, signalo atspindžiai ir pan. Todėl būtina atlikti tyrimą, kurio metu būtų nustatyti faktoriai, kurie turi įtaką defektų aptikimo tikimybei.

Eksperimentinio tyrimo metu yra naudojamas fokusuotas *Olympus V328-SU-F*, kurio parametrai yra artimi kompiuterinio modeliavimo metu naudojamiems keitikliams.

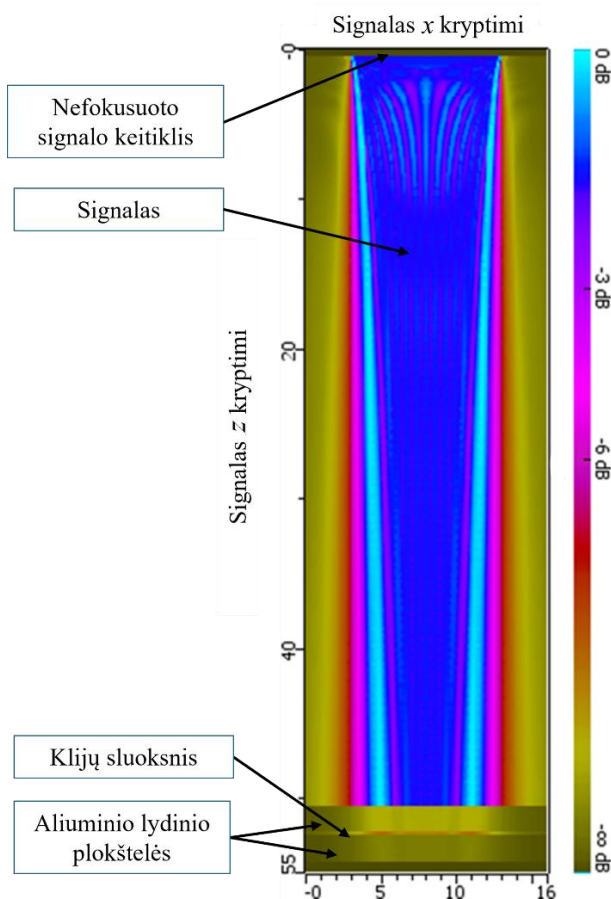
2.4.1. Nefokusuotas keitiklis

Atliekamas ultragarso bangos tyrimas, kai keitiklis yra nefokusuoto signalo. Šis tyrimas leidžia stebėti keitiklio spinduliuojamą signalą ir taip pamatyti, kokį plotą galima ištirti, naudojant tam tikrą keitiklį. Šio bandymo metu naudoto keitiklio parametrai yra pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Nefokusuoto keitiklio pagrindiniai parametrai

Parametras	Reikšmė
Keitiklio skersmuo, mm	10
Keitiklio dažnis, MHz	15
Keitiklio atstumas nuo bandinio, mm	50

Sklindanti ultragarso banga tyrimo metu, naudojant nefokusuotą keitiklį yra pavaizduota 18 pav.



18 pav. Nefokusuoto keitiklio ultragarso bangos akustinis laukas

Galima teigti, kad nefokusuoto keitiklio naudojimo atveju, ultragarso banga apima bandinio tiriamąjį plotą, kuris yra didesnis už naudojamo keitiklio plotą. Tai reiškia, kad skleidžiamas signalas gali atspindėti ne tik nuo defektų, bet ir nuo struktūros aplink defektą.

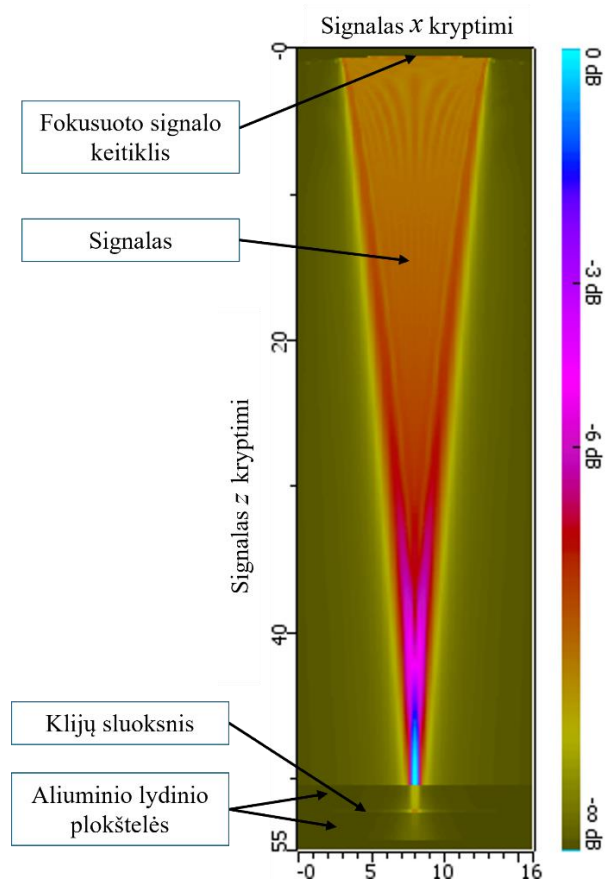
2.4.2. Fokusuotas keitiklis

Atliekamas tyrimas, kurio metu yra naudojamas fokusuoto signalo keitiklis. Svarbiausi šio keitiklio parametrai yra pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Fokusuoto keitiklio pagrindiniai parametrai

Parametras	Reikšmė
Keitiklio skersmuo, mm	10
Keitiklio dažnis, MHz	15
Keitiklio atstumas nuo bandinio, mm	50
Keitiklio fokusavimo ilgis, mm	52

Fokusuotos bangos akustinis laukas yra vaizduojamas 19 pav.



19 pav. Fokusuoto keitiklio ultragarso bangos akustinis laukas

Matoma, kad fokusuotas signalas sklinda į vieną tašką. Tai reiškia, kad signalas atsispindi tik nuo ten, kur yra nukreiptas keitiklis, todėl yra lengviau tirti norimas vietas.

3. Rezultatai

Šiame skyriuje yra pateikiami *CIVA 2021* kompiuterinės programos A tipo, B tipo ir C tipo bandinio vaizdai, naudojant fokusuotą bei nefokusuotą keitiklius. Gauti kompiuterinio modeliavimo duomenys palyginami su eksperimentiniais rezultatais. Taip pat, naudojant *CIVA 2021* kompiuterinę įrangą, sudaromas metamodelis. Aptariamos defekto aptikimo tikimybės, naudojant skirtingo tipo keitiklius.

3.1. Kompiuterinis modeliavimas: defektų aptikimas ir vizualizavimas

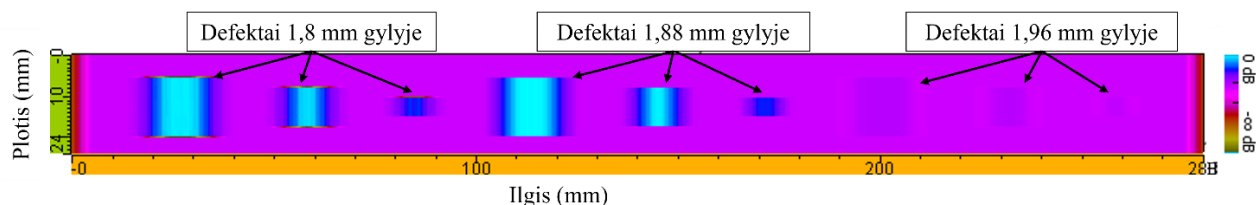
Tyrimas yra pradedamas nuo defektų aptikimo kompiuteriniame modelyje, naudojant fokusuotą ir nefokusuotą keitiklius, bei eksperimentiniame bandinyje, naudojant fokusuotą *Olympus V328-SU-F* keitiklį. Pateikiami ir palyginami šių bandymų A, B ir C tipo vaizdai.

Analizuojant tiriamojo bandinio A tipo vaizdą, galima palyginti atsispindėjusių signalų stiprumus bei nustatyti gylį, kuriame yra defektas. B tipo vaizde yra vizualizuojamas defektų pasiskirstymas bandinio storyje ir ilgyje, tai padeda nustatyti, kokiame gylyje yra defektas bei koks yra defekto dydis. Matomas atsispindėjusių signalų stiprumas. Bandinio C tipo vaizdas leidžia stebėti tiriamojo objekto vientisumą ilgio ir pločio atžvilgiu. Taip pat toks vaizdas vizualizuoja pažeidimų galimą formą ir dydį bei atsispindėjusių signalų stiprumą. Tyrimas yra atliekamas tam, kad būtų išsiaiškinta, kokio keitiklio naudojimas yra efektyvesnis, ieškant defektų klijuotų jungčių klijų sluoksnyje.

3.1.1. Defektų aptikimas ir vizualizavimas, naudojant nefokusuoto tipo keitiklį

Siekiant gauti kompiuterinio bandinio C tipo vaizdą, atliekamas tiriamo objekto klijuoto sujungimo skenavimas x ir y kryptimis kas 0,5 mm. Skenuojamas yra visas bandinio paviršiaus plotas.

Naudojant nefokusuoto tipo keitiklį, gautas C tipo vaizdas yra pateiktas 20 pav.

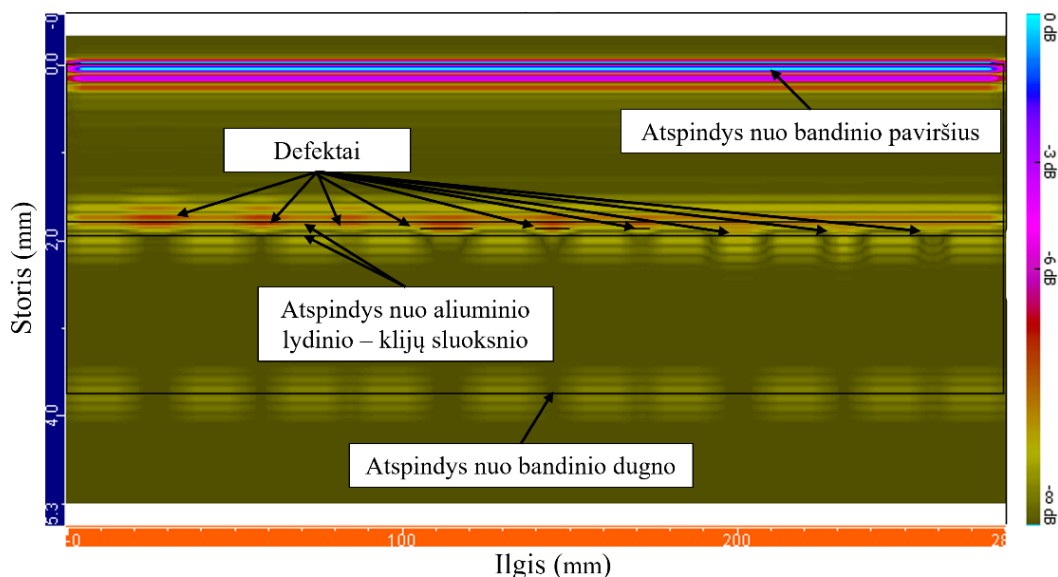


20 pav. Skenuotas C tipo vaizdas, kai keitiklis nefokusuotas

Bandinio C tipo vaizde matoma, kaip yra pasiskirstę 9 defektai bandinio ilgyje ir plotyje. Pastebima, kad skirtinguose gyliuose esantys defektai matomi nevienodai. Prasčiausiai yra matomi defektai, kurie yra arčiau apatinės plokštelės paviršiaus (1,96 mm gylyje), o geriausiai – arčiau viršutinės plokštelės paviršiaus. Taip pat galima pastebėti, kad defektai, kurių briaunų dydis 5 mm, matomi ne taip gerai, kaip didesni defektai, kurių dydis 10 mm ir 15 mm. Signalas nuo mažiausių 5 mm dydžio defektų yra išsisklaidęs. Taip yra todėl, kad jų plotas yra mažesnis už keitiklio skleidžiamo signalo plotą, todėl signalas atsispindi nuo defekto ir aplinkinių paviršių. Taip pat visų defektų, esančių klijų sluoksnyje, ribos nėra aiškios, išsiliejusios. Vadinasi, šiuo atveju, naudojant nefokusuoto tipo keitiklį, galima aptikti defektų vietą, tačiau spinduliuojamas keitiklio signalas atsispindi ne tik nuo defektų, bet ir aplink juos esančių paviršių, todėl yra sudėtinga nustatyti defektų formas ir dydžius.

Tam, kad būtų gautas kompiuterinio modelio B tipo vaizdas, keitiklis yra skenuojamas per vidurį bandinio pločio atžvilgiu. Vadinasi, keitiklis nuo ilgosios bandinio kraštinės yra nutolęs 12,5 mm. Skenavimas atliekamas bandinio x kryptimi kas 0,5 mm.

Bandinio B tipo vaizdas, kai naudojamas nefokusuotas keitiklis, yra pavaizduotas 21 pav.

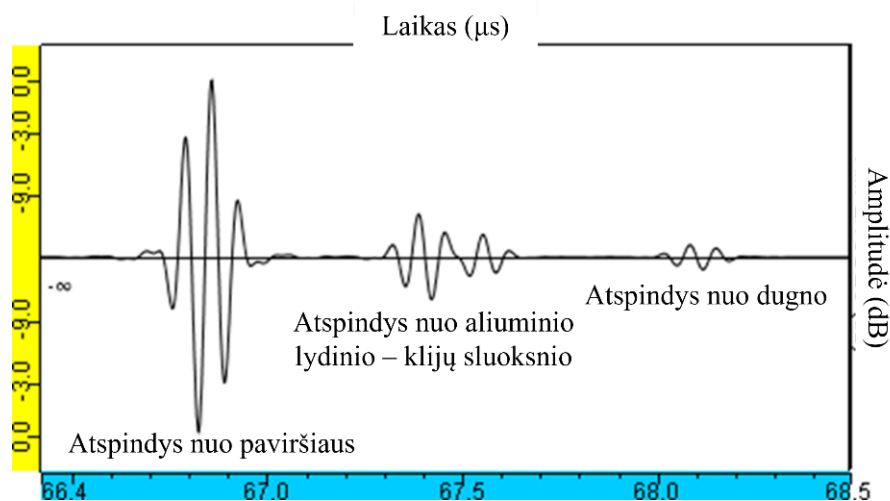


21 pav. Skenuotas B tipo vaizdas, kai keitiklis nefokusuotas

Naudojant nefokusuotą keitiklį, B tipo vaizde galima ne tik tirti bandinio vientisumą, bet ir pamatyti tiriamojo objekto struktūrą, t. y. atspindžius nuo bandinio paviršiaus, sandūros tarp skirtingų medžiagų, bandinio dugno. Vaizduojami atspindžiai leidžia aptikti defektus ir nustatyti jų gylį. Šiame vaizde matoma, kad geriau aptinkami defektai, esantys arčiau paviršiaus. Nuo jų atsispindi didesnės amplitudės signalas. Tačiau pastebima, kad tiek nuo 1,8 mm, tiek nuo 1,88 mm gylyje esančių defektų signalo atspindžiai yra stipresni ne nuo defektų, o nuo klijų sluoksnio ribos. Taip yra todėl, nes bangos sklaidimo laukas yra platus, todėl keitiklis priima atsispindėjusį signalą nuo ribos tarp aliuminio lydinio plokštelės ir klijų sluoksnio ir šalia defektų esančios aplinkos. O defektai, esantys giliau, signalą atspindi prasčiau, signalas virš jų taip pat stipresnis nuo ribos tarp aliuminio lydinio plokštelės ir klijų sluoksnio. Visų defektų atspindžiai yra iškraipyti, defektų ribos nėra aiškios. Nėgana to, B tipo vaizde aiškiai matoma, kad didžiausias signalo atspindys yra atspindimas nuo viršutinės 2024 aliuminio lydinio plokštelės paviršiaus. Taip yra todėl, nes šį paviršių keitiklio spinduliuojamas signalas pasiekia pirmą.

Toliau vaizduojamas A tipo vaizdas, kuriame fiksuojamos atsispindėjusio ultragarso signalo amplitudės. Keitiklio padėtis pločio atžvilgiu paliekama tokia pati, kaip ir skenuojant B tipo vaizdą. O ilgio atžvilgiu – keitiklis yra pozicionuojamas virš kiekvieno defekto vidurio taško.

Tam, kad būtų galima palyginti atsispindėjusių signalų amplitudžių skirtumą tarp vietų be pažeidimų, skirtingų dydžių ir gylių defektų, tyrimas pradedamas nuo matavimų vietoje, kurioje nėra defekto (žr. 22 pav.).



22 pav. Skenuotas A tipo vaizdas, kai nėra defekto, o keitiklis nefokusuotas

A tipo vaizde taip pat vaizduojami atspindžiai, atsispindėję nuo skirtingų bandinio sluoksnių. Tačiau horizontalioje ašyje yra žymimas laikas, per kurį ultragarso banga pasiekia tam tikrą paviršių ir nuo jo atsispindi atgal. Pagal laiką galima įvertinti tiriamų medžiagų storį, jose esančio defekto gylį, jei yra žinomas ultragarso bangos greitis tose medžiagose. O vertikalioje ašyje – amplitudė, kuri apibrėžia grįžusio signalo stiprumą decibelais. Vadinasi, kuo didesnė signalo amplitudė, tuo didesnis atspindys, o didesnis atspindys nurodo, kad šalia esančių skirtingų medžiagų akustinių impedansų skirtumas yra didelis. Kai nėra defekto, aiškiausiai yra pastebimas signalo atspindys, kuris atsispindi nuo bandinio paviršiaus. Šis signalas yra pirmas ir stipriausias. Dėl šios priežasties toks atspindys nuo bandinio paviršiaus yra stipriausias visų bandymų metu. Taip pat matomas atsispindėjęs signalas nuo aliuminio lydinio ir klijų sluoksnio. Kadangi šiuo atveju nėra defekto, nuo kurio atsispindėtų signalas, tai galima pastebėti ultragarso bangos atspindį nuo bandinio dugno. Šio tyrimo metu atsispindėjusio signalo amplitudė yra lygi $-12,4$ dB.

Šis tyrimas yra atliekamas visiems bandinio klijų sluoksnyje esantiems defektams, o 3 lentelėje yra pateikiamos gautosios signalų, atsispindėjusių nuo defektų, amplitudės.

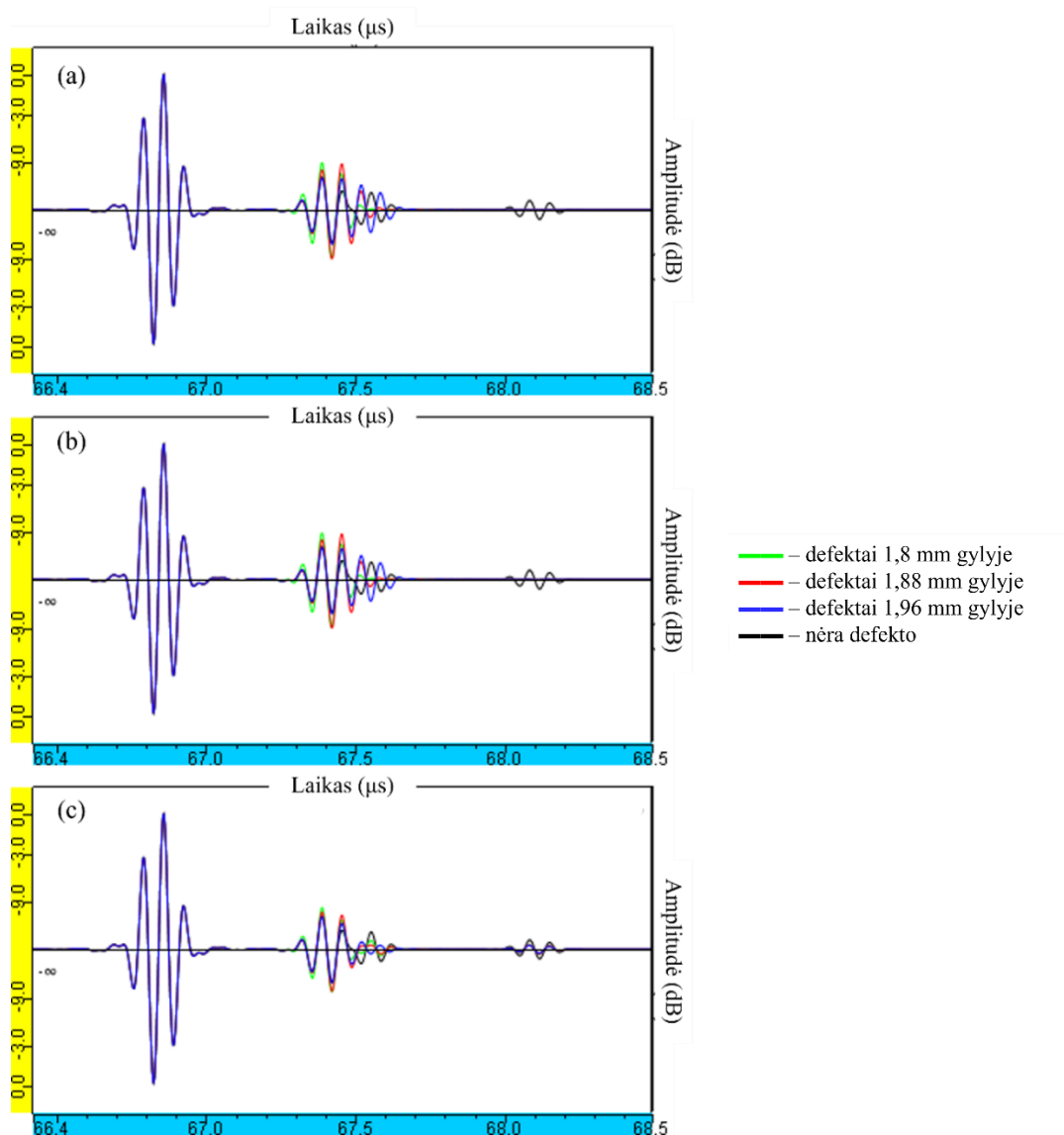
4 lentelė. Signalų, atsispindėjusių nuo defektų, amplitudės, kai keitiklis nėra fokusuotas

Gylis, mm	Defekto dydis, mm	Nuo defekto atsispindėjusio signalo amplitudė, dB	Atsispindėjusio signalo amplitudė, kai nėra defekto, dB	Skirtumas tarp atsispindėjusių signalų nuo defektų ir nuo vietų, kuriose nėra defektų, amplitudžių, dB	Skirtumas tarp amplitudžių, % (nuo defekto)	Skirtumas tarp amplitudžių, % (nuo signalo amplitudės, kai nėra defekto)
1,8	15	-9,2	-12,4 dB	3,2	35	26
	10	-9,3		3,1	33	25
	5	-10,3		2,1	20	17

Gylis, mm	Defekto dydis, mm	Nuo defekto atspindėjusio signalo amplitudė, dB	Atspindėjusio signalo amplitudė, kai nėra defekto, dB	Skirtumas tarp atspindėjusių signalų nuo defektų ir nuo vietų, kuriose nėra defektų, amplitudžių, dB	Skirtumas tarp amplitudžių, % (nuo defekto)	Skirtumas tarp amplitudžių, % (nuo signalo amplitudės, kai nėra defekto)
1,88	15	–8,9	–12,4 dB	3,5	39	28
	10	–9		3,4	38	27
	5	–10,2		2,2	22	18
1,96	15	–11,9		0,5	4	4
	10	–12		0,4	3	3
	5	–12,1		0,3	2	2

Iš duomenų lentelėje matoma, kad silpniausias signalas, kurio amplitudė –12,1 dB, atspindi nuo 5 mm defekto, kuris yra 1,96 mm gylyje. Ši signalo amplitudė yra artima signalo amplitudei, kai defekto nėra. Tarp šių signalų amplitudžių skirtumas yra 0,3 dB. Taip pat šiame gylyje esančių 15 mm ir 10 mm dydžių defektų signalo amplitudės atitinkamai yra lygios –11,9 dB ir –12 dB, o tai reiškia, kad nuo signalo amplitudės be defekto jos skiriasi tik 0,5 dB ir 0,4 dB. Akivaizdu, kad, naudojant nefokusuotą keitiklį, yra sunku aptikti giliau esančius defektus, nes nuo jų atspindėjusių signalų amplitudės yra artimos signalo amplitudei, kai nėra defekto. Stipriausi atspindžiai gaunami nuo 15 mm ir 10 mm dydžio defektų, esančių 1,88 mm gylyje. Jų amplitudės atitinkamai lygios –8,9 dB ir –9 dB, o skirtumas nuo vietos be defekto – 3,5 dB ir 3,4 dB.

Defektai yra suskirstomi į atskirus grafikus pagal dydį (žr. 23 pav.). Taip yra paprasčiau analizuoti tikimybę aptikti tam tikro dydžio defektą skirtingame gylyje.

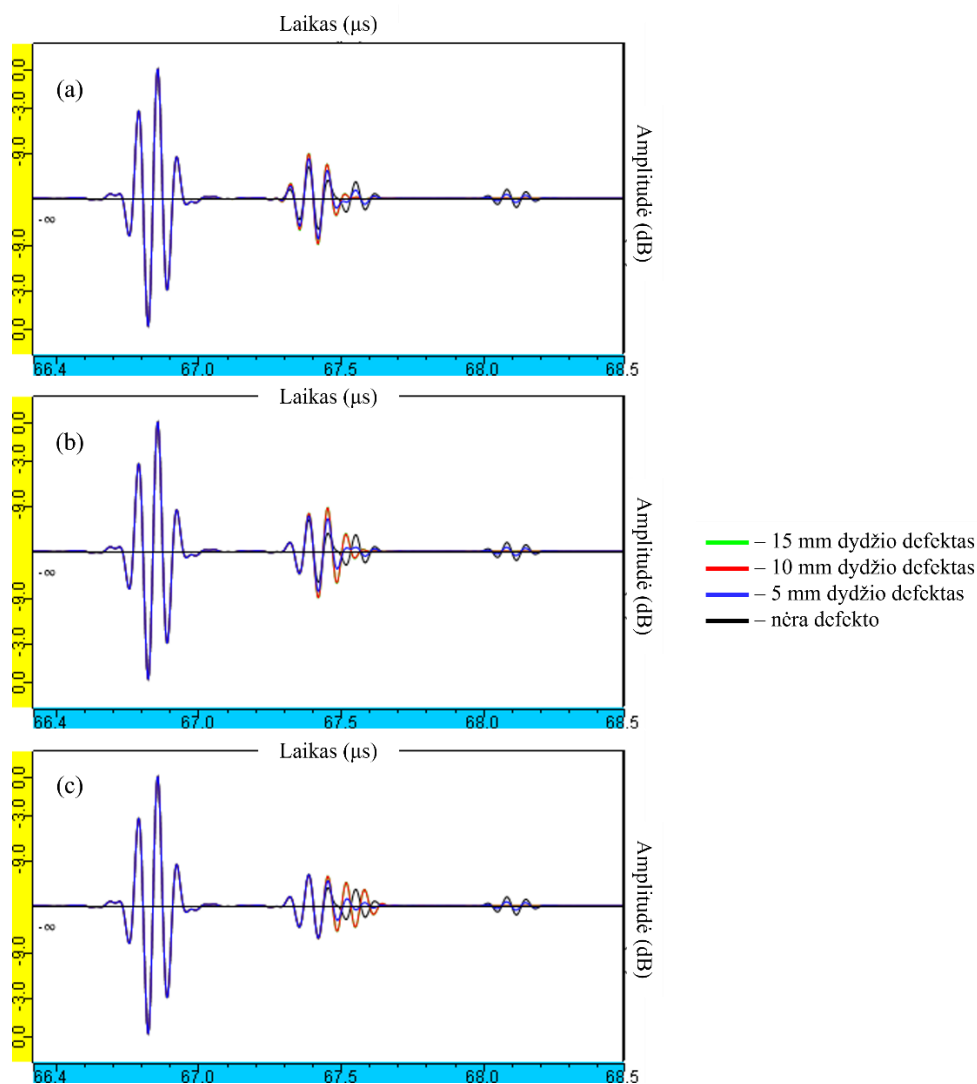


23 pav. Skenuoti A tipo vaizdai, kai keitiklis nefokusuotas, o defektų dydžiai: (a) 15 mm, (b) 10 mm, (c) 5 mm.

Pagal pateiktus grafikus galima palyginti skirtingų gylių poveikį signalo atspindžiui nuo defekto.

Galima pastebėti, kad didžiausias atspindėjusio ultragarsinio signalo amplitudės turi defektai, esantys 1,8 mm ir 1,88 mm gyliuose. Taip yra todėl, nes šie defektai yra arčiau paviršiaus ir signalas nesusilpnėja. Grafike (c), kuris vaizduoja atspindžius nuo 5 mm dydžio defekto, pastebima, kad signalas atspindi nuo bandinio dugno. Taip yra todėl, nes keitiklio spinduliuojamos ultragarso bangos laukas yra didesnis už defektą, todėl signalas atspindi nuo kitų paviršių, dugno, ne tik nuo defekto, todėl šiuo atveju galima pastebėti signalą nuo bandinio dugno. Taip pat bandinys nėra homogeniškas, jis sudarytas iš aliuminio lydinio plokštelių ir klijų sluoksnių. Dėl šių medžiagų skirtingų tankių, signalas pereidamas skirtingas terpes atspindi nuo jų. Tokie atspindžiai yra iškraipyti, todėl yra sunkiau juos interpretuoti.

Kompiuterinio modelio atspindėjusių signalų nuo defektų A tipo vaizdai yra suskirstomi pagal gylį (žr. 24 pav.).

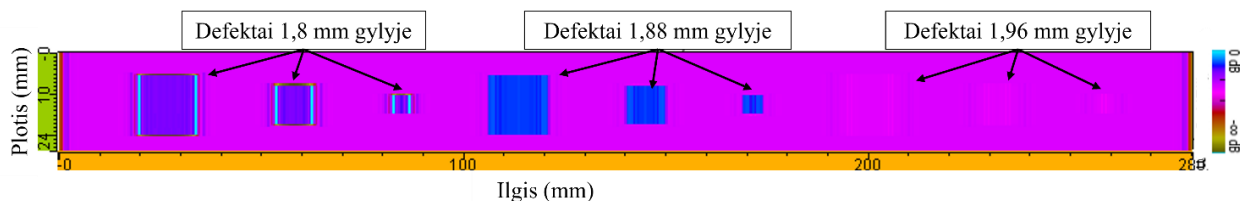


24 pav. Skenuoti A tipo vaizdai, kai keitiklis nefokusuotas, o defektų gyliai: (a) 1,8 mm, (b) 1,88 mm, (c) 1,96 mm

Grafikuose lyginama defektų dydžio įtaka atspindimo signalo stiprumui. Matoma, kad kiekviename gylyje defektų, kurių briaunų ilgiai 15 mm ir 10 mm, atspindimų signalų stiprumai yra labai panašūs, o nuo 5 mm dydžio defekto atspindėto signalo amplitudės skiriasi. Jos yra mažesnės ir signalas atspindi ne tik nuo bandinyje esančio defekto, bet ir nuo bandinio dugno, nes keitiklio skleidžiamos bangos laukas yra didesnis už defektą, todėl signalas pasiekia dugną. Ir taip gaunami daugkartiniai signalo atspindžiai, nes signalas turi pereiti per skirtingo tankio bandinio medžiagas. Taip pat galima pastebėti, kad tokio atspindėjusio signalų amplitudės yra mažesnės dėl signalo išsisklaidymo, kuris atsiranda, kai jis pereina per skirtingų tankių terpes.

3.1.2. Defektų aptikimas ir vizualizavimas, naudojant fokusuoto tipo keitiklį

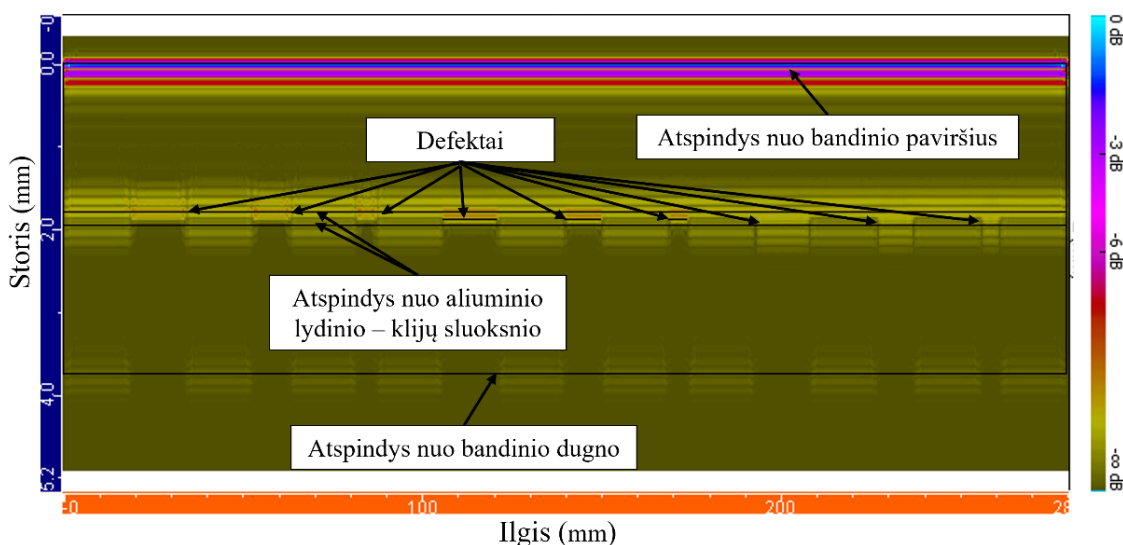
Skenuojant bandinį fokusuotu keitikliu, gautas C tipo vaizdas vaizduojamas 25 pav. Skenavimas atliekamas x ir y kryptimis kas 0,5 mm.



25 pav. Skenuotas C tipo vaizdas, kai keitiklis fokusuotas

Kaip ir tyrimo metu su nefokusuotu keitikliu, defektai 1,96 mm gylyje matomi neryškiai, atspindimas susilpnėjęs signalas. Geriausiai ultragarso banga atsispindi nuo defektų, esančių 1,88 mm gylyje. Tačiau galima pastebėti, kad šiuo atveju atitinkamo gylio skirtingų dydžių defektų skiriamoji geba yra labai panaši. Negana to, defektų ribos yra ryškesnės, neišsisklaidžiusios. Taip yra dėl to, nes keitiklio spinduliuojamas fokusuotas signalas atsispindi tik nuo to taško, į kurį jis yra nukreiptas, o šalia esantys paviršiai turi mažesnę įtaką. Todėl galima atskirti, kurioje vietoje prasideda ir baigiasi defektas, yra aiški jo forma ir padėtis bandinio ilgio ir pločio atžvilgiu.

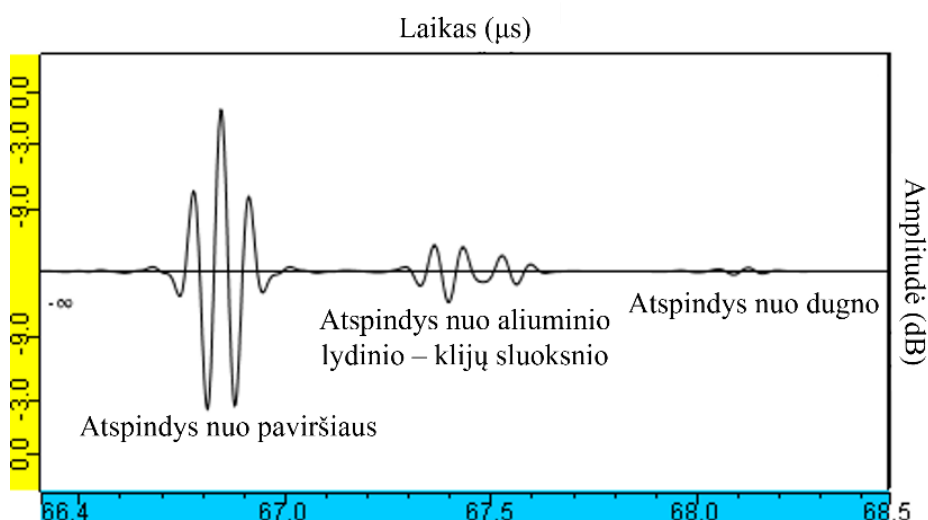
Atliekamas skenavimas x kryptimi kas 0,5 mm, kai keitiklis padėtas 12,5 mm nuo ilgosios bandinio kraštinės. Gautas B tipo vaizdas pateiktas 26 pav.



26 pav. Skenuotas B tipo vaizdas, kai keitiklis fokusuotas

B tipo vaizde, kai naudojamas fokusuotas keitiklis, signalas stipriausiai atsispindi nuo bandinio paviršiaus, nes tai yra pirmasis grįžtantis signalas. Taip pat matomi atspindžiai nuo skirtingų bandinio struktūros komponentų. Negana to, galima atskirti defektų ribas. Tačiau šiuo atveju, signalas stipriausiai atsispindi nuo defektų, esančių 1,88 mm gylyje, lyginant su 1,8 mm ir 1,96 mm gylyje esančiais defektais.

Lyginami atspindžiai nuo defektų. Vaizduojamas atspindėjusio signalo nuo vietos, kurioje nėra pažeidimo, A tipo vaizdas (žr. 27 pav.). Šio signalo vaizdavimas yra reikalingas tam, kad būtų galima palyginti su nuo defektų atspindėjusių signalų amplitudėmis.



27 pav. Skenuotas A tipo vaizdas, kai nėra defekto, o keitiklis fokusuotas

Kompiuterinio modelio, kai naudojamas fokusuoto tipo keitiklis, skenuotame A tipo vaizde matoma, kad vietoje, kurioje nėra defekto, atspindėjusio signalo amplitudė yra $-17,5$ dB. Gauta amplitudė yra $5,1$ dB silpnesnė nei tada, kai naudojamas nefokusuoto tipo keitiklis. Šiame skenuotame A tipo vaizde taip pat matosi atspindžiai nuo bandinio paviršiaus, dugno, ribų tarp skirtingų medžiagų.

Išmatuojamos nuo visų gylių skirtingų dydžių defektų atspindėjusių signalų amplitudės. Gauti atspindžių stiprumai pateikiami 5 lentelėje.

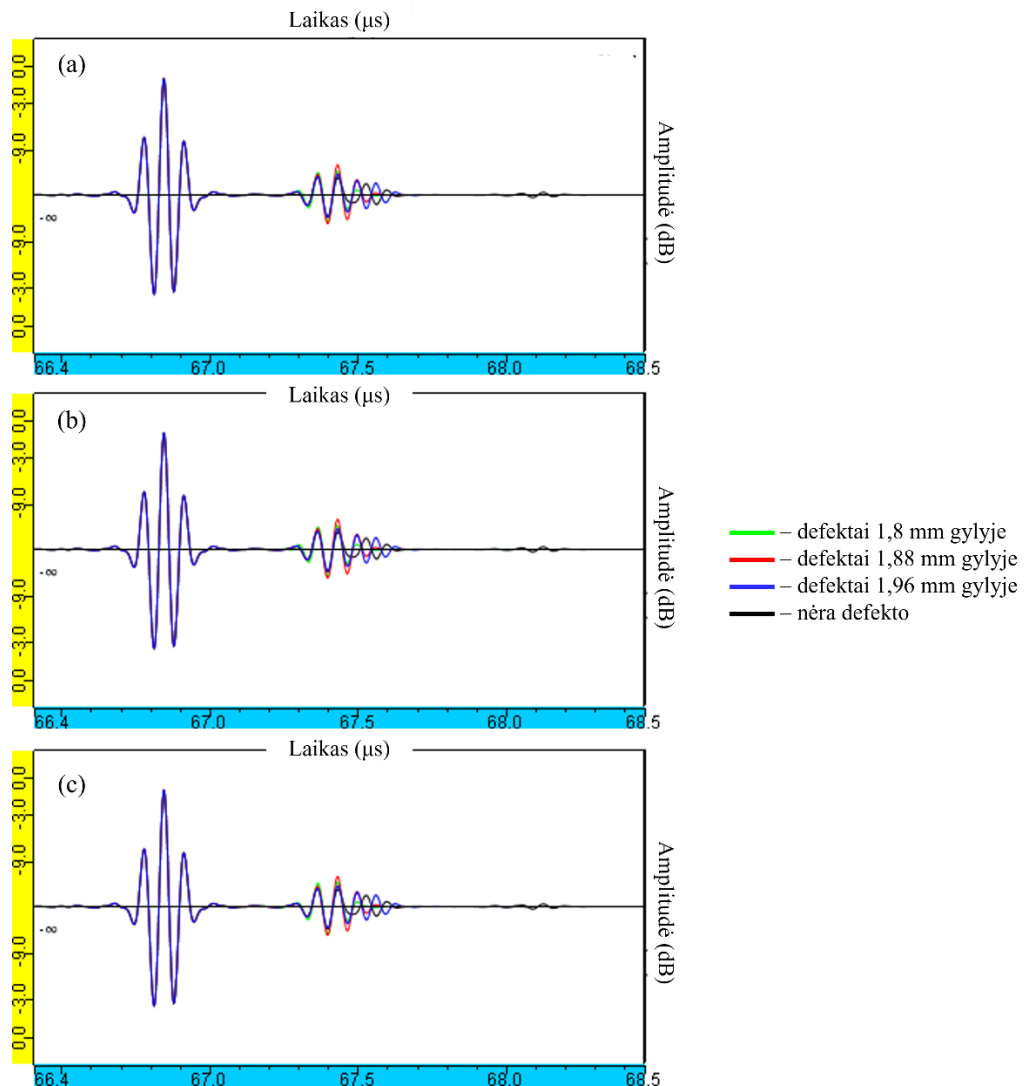
5 lentelė. Signalų, atspindėjusių nuo defektų, amplitudės, kai keitiklis fokusuotas

Gylis, mm	Defekto dydis, mm	Nuo defekto atspindėjusio signalo amplitudė, dB	Atspindėjusio signalo amplitudė, kai nėra defekto, dB	Skirtumas tarp atspindėjusių signalų nuo defektų ir nuo vietų, kuriose nėra defektų, amplitudžių, dB	Skirtumas tarp amplitudžių, % (nuo defekto)	Skirtumas tarp amplitudžių, % (nuo signalo amplitudės, kai nėra defekto)
1,8	15	$-14,7$	$-17,5$	2,8	19	16
	10	$-14,7$		2,8	19	16
	5	$-14,7$		2,8	19	16
1,88	15	$-12,7$		4,8	38	27
	10	$-12,7$		4,8	38	27
	5	$-12,7$		4,8	38	27
1,96	15	-16		1,5	9	9
	10	-16		1,5	9	9
	5	-16		1,5	9	9

Lentelėje matoma, kad šiuo atveju nuo skirtingų defektų atspindėjusių signalų amplitudės vienoduose gyliuose yra panašios. Taip yra todėl, nes keitiklio spinduliuojama banga yra

koncentruota ir atsispindi tik nuo tos vietos, į kurią yra nukreiptas keitiklis. Šiuo atveju, mažiausia atspindėjusio ultragarsinio signalo amplitudė -16 dB atsispindi nuo $1,96$ mm gylyje esančių defektų. Tokiame gylyje esančių defektų atspindžių stiprumo skirtumas su atspindžiais nuo vietų, kuriose nėra defektų, lygus $1,5$ dB. O stipriausiai atspindėjusių signalų (amplitudė $-12,7$ dB), atspindinčių nuo defektų, esančių $1,88$ mm gylyje, skirtumas su atspindžiu nuo vietos be pažeidimų yra $4,8$ dB. Akivaizdu, kad kompiuterinio modeliavimo metu, kai tyrimas yra atliekamas fokusuotu keitikliu, gaunamas didesnis atspindėjusių signalų skirtumas tarp klijuotos jungties klijų sluoksnio pažeistų ir nepažeistų vietų nei tuo atveju, kai naudojamas nefokusuotas keitiklis. Taip pat galima teigti, kad didelę įtaką tikimybei aptikti defektą turi gylis, kuriame yra defektas. Kuo defektas giliau, tuo signalas yra labiau slopinamas klijų sluoksnyje, atspindys nuo defekto gaunamas silpnas. O atspindžiai nuo pažeidimų, kurie yra sandūroje tarp aliuminio lydinio plokštelės ir klijų sluoksnio ($1,8$ mm gylyje), yra silpnesni nei klijų sluoksnyje ($1,88$ mm gylyje) esančių defektų, nes atspindys nuo aliuminio lydinio ir klijų ribos sumažina defekto sukeltą atspindėto signalo amplitudės pokytį.

28 pav. pateikiami kiekvieno dydžio defekto A tipo vaizdai, kuriuose matoma, kokia įtaką defektui aptikti turi gylis, kuriame jis yra.

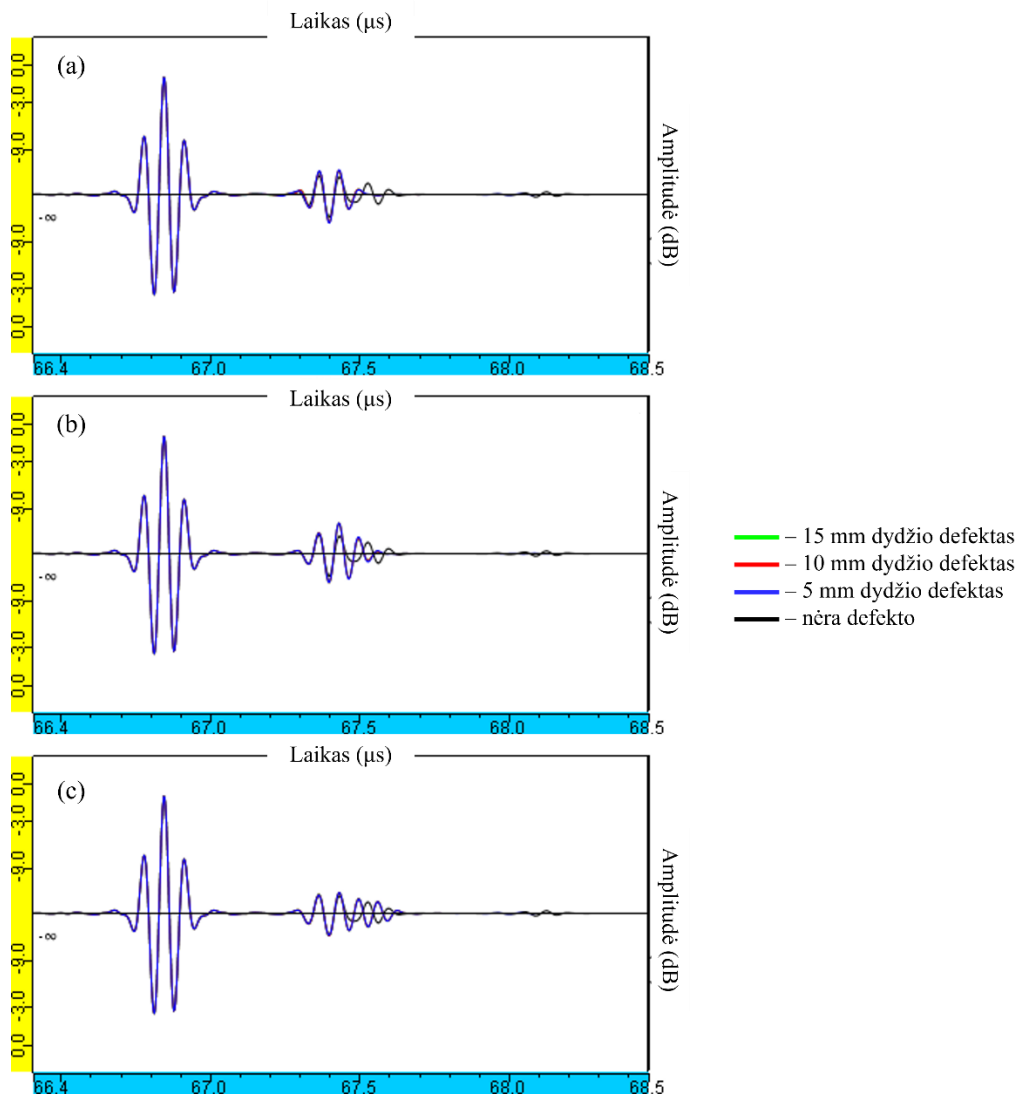


28 pav. Skenuoti A tipo vaizdai, kai keitiklis fokusuotas, o defektų dydžiai: (a) 15 mm, (b) 10 mm, (c) 5 mm

Matoma, kad stipriausiai signalas atsispindi nuo pažeidimų, esančių $1,88$ mm gylyje. Taip pat

pastebima, kad silpniausias signalas yra tada, kai šis atspindi nuo 1,96 mm gylyje esančių defektų. Taip yra todėl, kad klijų sluoksnis slopina sklindantį signalą. Svarbu tai, kad kompiuterinio modeliavimo metu, kai naudojamas fokusuotas keitiklis, defektų A tipo vaizduose nėra fiksuojami signalo atspindžiai nuo dugno. Vadinasi, keitiklio spinduliuojamas signalas atspindi tik nuo defekto.

Pateikiami ultragarsinio signalo atspindžių grafikai (žr. 29 pav.), kurie suskirstyti pagal defektų gylį.



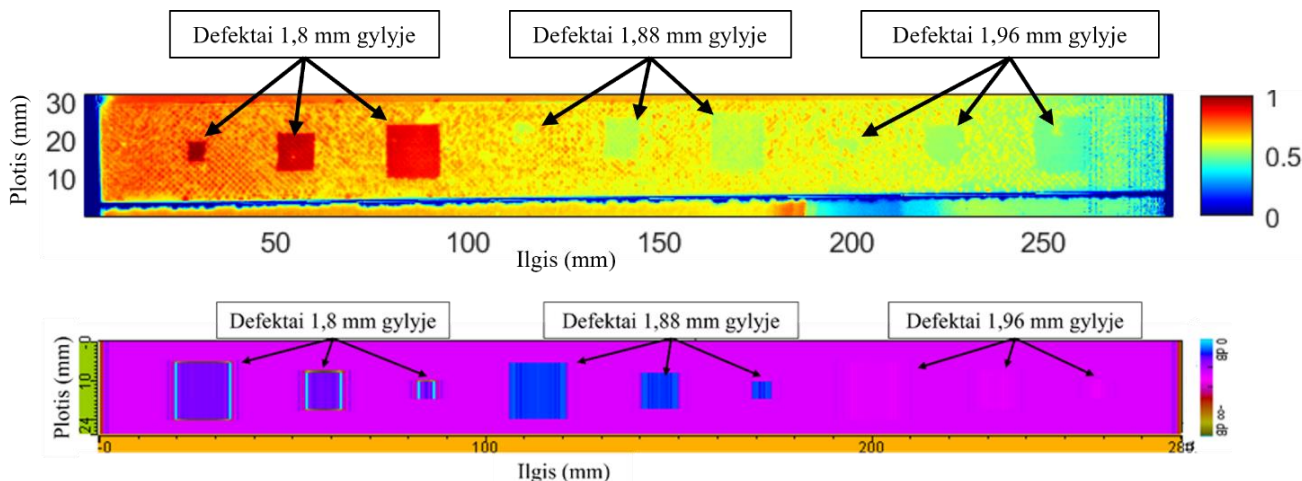
29 pav. Skenuoti A vaizdai, kai keitiklis fokusuotas, o defektų gyliai: (a) 1,8 mm, (b) 1,88 mm, (c) 1,96 mm

Grafikuose pastebima, kad kiekviename gylyje esančių defektų atspindžių amplitudės sutampa. Taip yra, nes naudojamas fokusuotas keitiklis, todėl ultragarso bangos signalas yra siunčiamas koncentruotas į vieną vietą. Dėl šios priežasties nuo tame pačiame gylyje esančių defektų ultragarso banga atspindi vienodai, nes aplinkos sąlygos tuose pačiuose gyliuose yra vienodos. Taigi, atliekant imersinį aido impulsinį ultragarsinį tyrimą su fokusuotu keitikliu, gaunamos atspindėjusių nuo defektų signalų amplitudės atitinkamuose gyliuose yra vienodos.

Taigi, atliekant ultragarso imersinį tyrimą su fokusuotu bei nefokusuotu keitikliais, ir A, ir B tipo skenuotuose vaizduose pastebima, kad didesnė tikimybė yra aptikti tuos defektus, kurie yra arčiau bandinio paviršiaus. Be to, kai naudojamas fokusuoto signalo keitiklis, yra paprasčiau interpretuoti signalą, nes gauti vaizdai yra ryškesni, aiškesnės defektų ribos.

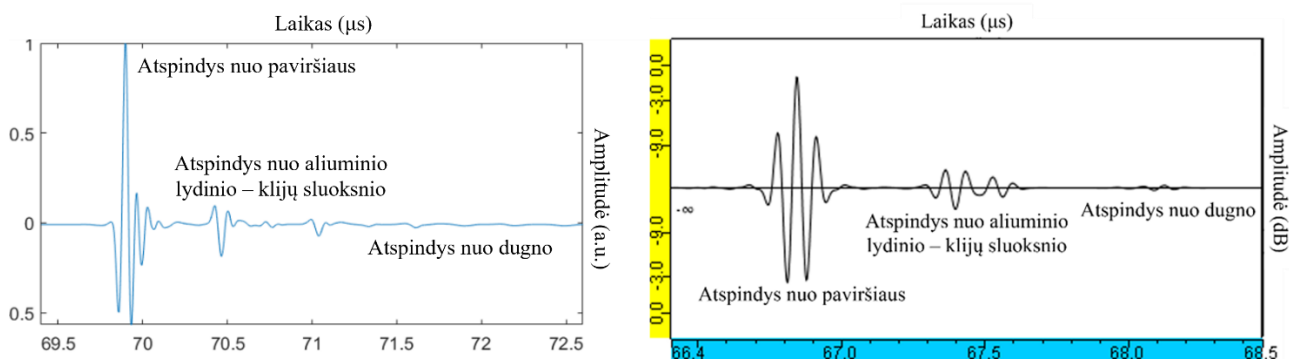
3.2. Eksperimentinis kompiuterinio modelio tinkamumo patvirtinimas

Kompiuterinio modelio tinkamumo patvirtinimui, palyginami kompiuterinio modelio rezultatai su eksperimentiškai gautais. Eksperimentinio tyrimo metu yra naudojamas 10 mm skersmens *Olympus V328-SU-F* keitiklis. Šio keitiklio spinduliuojamas signalas yra 15 MHz dažnio, fokusuotas, parametrai tokie pat kaip pateikti 2.4. skyrelyje.



30 pav. Skenuotas bandinio C tipo vaizdas: viršuje – eksperimentinis bandymas, apačioje – kompiuterinis modeliavimas

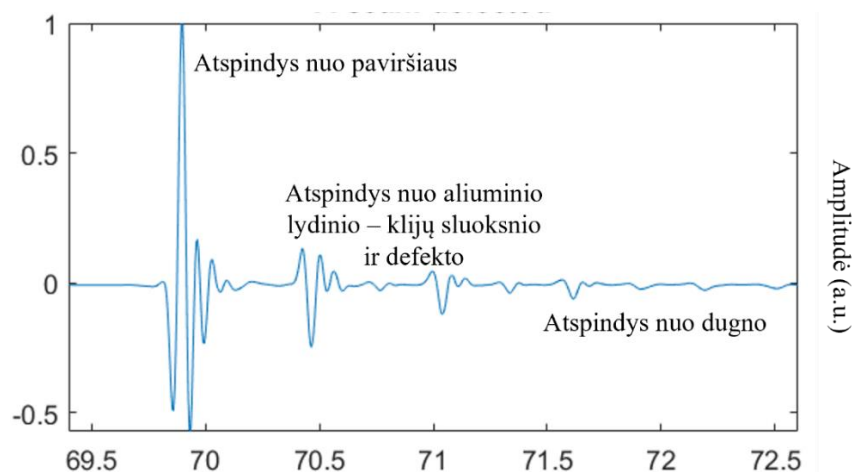
Iš eksperimentiniu būdu gauto C tipo vaizdo (žr. 30 pav.) pastebima, kad geriausiai yra matomi defektai, kurie yra arčiau plokštelės viršaus. Prasčiausiai matosi giliau esantys defektai. Be to, skiriasi mažesnio dydžio defektų skiriamoji geba – jų vaizdas nėra toks ryškus, koks yra didesnių defektų. Lyginant su kompiuterinio modelio C tipo vaizdu, giliausiai esantys defektai abejais atvejais matosi prastai, atspindėjęs signalas išsikraipęs ir silpnas.



31 pav. Skenuotas A tipo vaizdas, kai nėra defekto: kairėje – eksperimentinis bandymas, dešinėje – kompiuterinis modeliavimas

Skenuotuose A tipo vaizduose, kai nėra defekto (žr. 31 pav.), pastebimas skirtumas tarp atspindėjęs signalo sklidimo laiko. Eksperimentinio bandymo atspindėtas signalas fiksuojamas vėlesniu laiku nei kompiuterinio modelio. Tai galėjo nutikti dėl neteisingos keitiklio padėties, kai keitiklis per daug nutolęs nuo bandinio, naudojamų aliuminio lydinio plokštelių storių paklaidos, skirtumo tarp klijų sluoksnio storių. Tačiau atspindžių amplitudės ir laikas tarp atspindžių yra panašūs, todėl galima teigti, kad kompiuterinis modelis sudarytas teisingai.

Taip pat atliekamas tyrimas virš defekto (žr. 32 pav.).



32 pav. Skenuotas A tipo vaizdas, kai yra defektas

Lyginant A tipo vaizdus, kai defekto nėra (žr. 31 pav.) ir kai šis yra (žr. 32 pav.), pastebima, kad nuo defekto atsispindėjęs signalas yra stipresnis, jo amplitudė yra didesnė nei tada, kai nėra defekto. Vadinasi, defektas tikrai yra aptinkamas eksperimentiškai, o kompiuterinis modelis yra tinkamas tikimybės aptikti defektą tyrimui.

3.3. Įtaką defektų aptikimui klijų sluoksnyje turinčių parametrų nustatymas

Atliekamas kompiuterinis modeliavimas, siekiant nustatyti, kurie parametrai turi didžiausią įtaką defektams klijų sluoksnyje aptikti. Tai yra reikalinga tam, kad, taikant ultragarsinį metodą ateityje, būtų žinoma, į kokius veiksnius reikia atkreipti dėmesį, jog būtų išlaikytas klijuoto sujungimo vientisumas, aptikti defektai.

Nustatomos defekto dydžio ir padėties bandinyje, bandinio pirmosios aliuminio lydinio plokštelės ir klijų sluoksnio storių, keitiklio pastatymo kampo, skleidžiamos bangos greičio, keitiklio padėties bandinio x koordinatės ašies atžvilgiu ir nutolimo nuo bandinio kitimo ribos. Tai reiškia, kad šie parametrai yra neapibrėžti. Vadinasi, keičiant šiuos parametrus, sumažėja arba padidėja tikimybė aptikti klijų sluoksnyje esančius defektus. Todėl yra būtina atlikti defekto aptikimo tikimybės tyrimą, kai šių parametrų reikšmės kinta. Tai reikalinga tam, kad būtų nustatyta tikimybė aptikti defektą įvairiomis sąlygomis. 6 lentelėje yra pateikiami tyrime naudoti parametrai ir jų nustatyti variacijos intervalai. Šie intervalai parinkti pagal bandinio struktūrą. Visų parametrų, išskyrus defekto dydžio, reikšmės yra modeliuojamos kaip atsitiktiniai dydžiai pagal normalųjį skirstinį, o defekto dydžio – paskirstytos tolygiai intervale nuo 0,01 mm iki 5 mm.

6 lentelė. Tyrimo metu keičiami parametrai

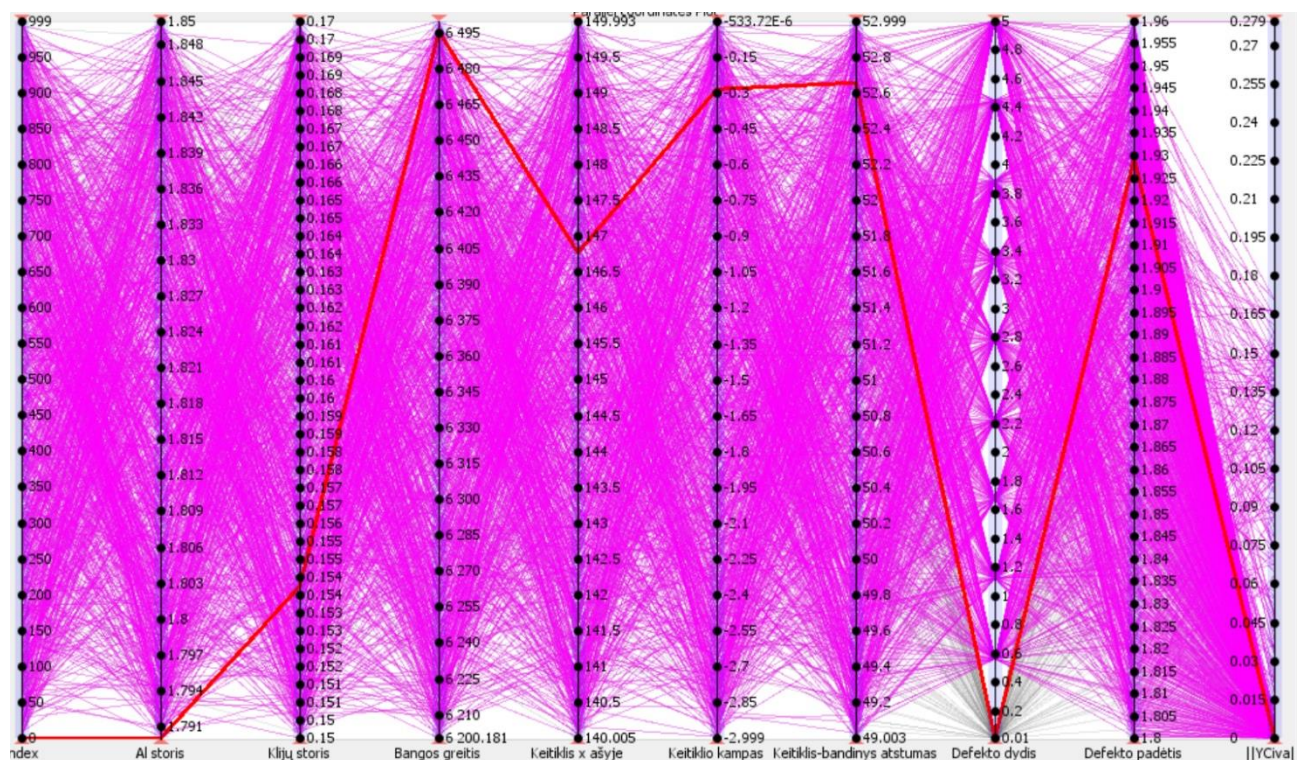
Parametras	Mažiausia reikšmė	Didžiausia reikšmė
Defekto dydis, mm	0,1	5
Defekto padėtis gylįje, mm	1,8	1,96
Aliuminio plokštelės storis, mm	1,79	1,85
Klijų storis, mm	0,15	0,17
Ultragarso bangos greitis, m/s	6200	6500

Parametras	Mažiausia reikšmė	Didžiausia reikšmė
Keitiklio pasvirimo kampas, °	-3	0
Atstumas tarp keitiklio ir bandinio, mm	50	51
Keitiklio padėtis bandinio x koordinatės ašies atžvilgiu, mm	140	150

Nuo defekto dydžio ir defekto padėties priklauso, nuo kur ir kaip stipriai atspindės keitiklio skleidžiamas signalas, nes, kuo defektas didesnis ir arčiau paviršiaus, tuo didesnė atspindėto signalo amplitudė. Taip pat įtaką ultragarso bangų sklaidimo laikui, nuostoliams ir interferencijai turi aliuminio lydinio plokštelės storis bei klijų sluoksnio storis. Tai svarbu, nes skiriasi šių medžiagų tankis, todėl skleidžiamas signalas jomis keliauja skirtingu greičiu, gali išsisklaidyti bei atsirasti papildomi signalo atspindžiai nuo ribos tarp klijų sluoksnio ir aliuminio lydinio plokštelės. Nemažiau svarbu yra keitiklio padėtis. Nuo keitiklio pasvirimo kampo, atstumo nuo bandinio ir padėties x koordinatės ašyje priklauso, kur sklinda signalas. Šių parametrų kitimas leidžia sukurti tokį metamodelį, kuris leistų prognozuoti defektų aptikimo tikimybę.

Iš viso nagrinėjama 1000 galimų atvejų. Tai reiškia, kad, siekiant nustatyti, kokie parametrai turi didžiausią įtaką defektų klijų sluoksnyje aptikimui, yra skaičiuojama ir įvertinama 1000 skirtingų parametrų kombinacijų. Kiekvienu atveju parenkamos skirtingos klijų storio, ultragarso bangos signalo greičio, keitiklio pasvirimo kampo, atstumo tarp keitiklio ir bangos, keitiklio padėties bandinio x koordinatės ašies atžvilgiu, defekto dydžio, defekto padėties gylyje ir aliuminio lydinio plokštelės storio reikšmės. Taip galima įvertinti defekto aptikimo tikimybę įvairiomis sąlygomis.

33 pav. vaizduojami tyrimo metu modeliuojami atvejai. Tiesės jungia skaičiavimams parinktus parametrus, iš kurių sudaromas metamodelis.

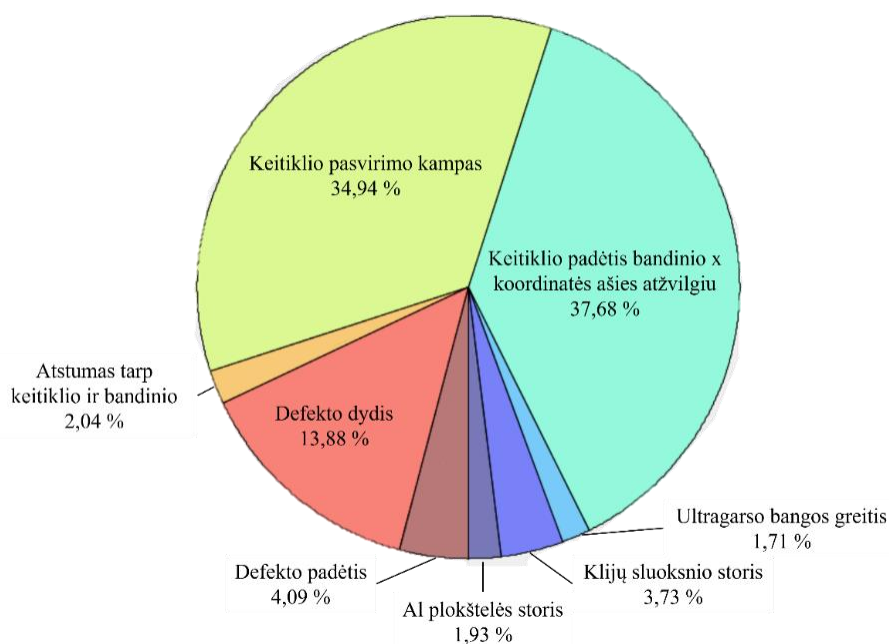


33 pav. Grafikas, vaizduojantis apskaičiuotus variantus, naudojamas metamodeliui sudaryti

Grafike, kuris naudojamas metamodelio sudarymui, pateikiamos skirtingos parametrų kombinacijos.

Jame vertikaliosios ašys vaizduoja skirtingus parametrus: aliuminio lydinio plokštelės storį, klijų sluoksnio storį, keitiklio spinduliuojamos ultragarso bangos greitį, keitiklio padėtį x koordinatės ašyje, keitiklio pasvirimo kampą, atstumą tarp bandinio ir keitiklio, defekto dydį, gylį, kuriame yra defektas. Kiekviena kreivė jungia skirtingas parametrų reikšmes ir taip yra gaunama 1000 skirtingų bandymų kombinacijų, kurios tiriamos ir analizuojamos. Raudona linija yra vienos kombinacijos pavyzdys.

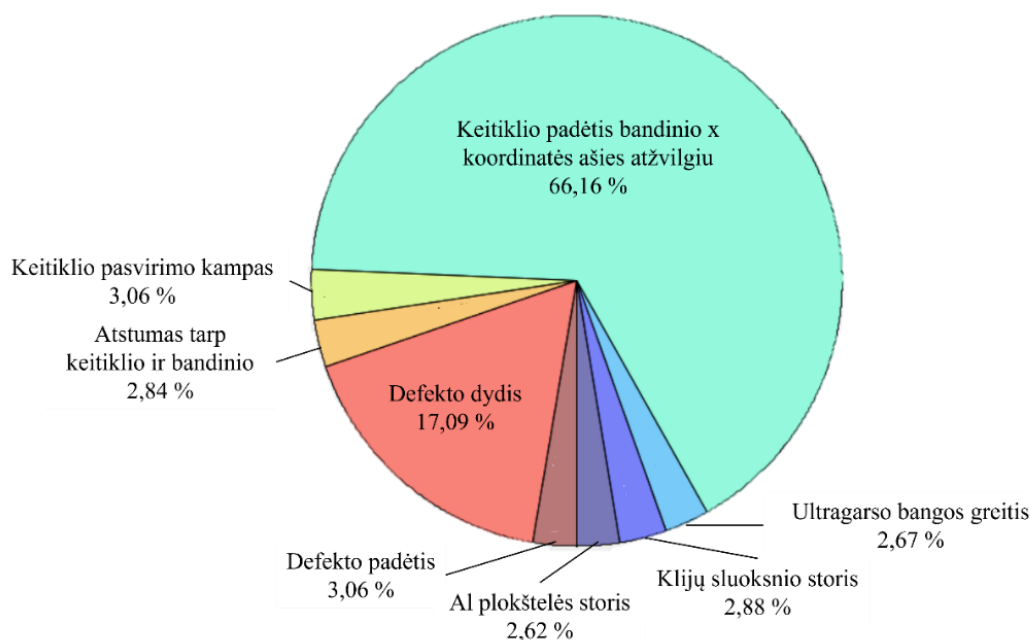
Atliekami skaičiavimai, taikant statistinį Sobolio indeksų metodą. Tokie indeksai apibrėžia kiekvieno įėjimo parametro dispersijos dalį ir įvertina kintamųjų įtaką modelio rezultatams. Taip pat parenkamas statistinis Krigingo interpoliacijos metodas nežinomų reikšmių nustatymui ir paklaidų įvertinimui, remiantis duomenų koreliacija. Atlikus skaičiavimus, nustatomi parametrai, turintys didžiausią įtaką defektų aptikimui, kai naudojamas nefokusuotas keitiklis (žr. 34 pav.).



34 pav. Parametrų įtaka tyrimo jautrumui, kai keitiklis nefokusuotas

Šiuo atveju, didžiausią 37,68 % įtaką turi keitiklio padėtis x koordinatės ašies atžvilgiu. Taip pat didelę 34,94 % įtaką turi keitiklio pastatymo kampas. Kiek mažesnę 13,88 % įtaką defekto aptikimui turi defekto dydis. Mažesnes įtakas tyrimo jautrumui turi aliuminio lydinio plokštelės storis (1,93 %), klijų sluoksnio storis (3,73 %), signalo greitis (1,71 %), atstumas tarp bandinio ir keitiklio (2,04 %) ir defekto padėtis gilyje (4,09 %). Šiuo atveju gauta, kad didelę įtaką defekto aptikimui turi defekto dydis ir jo vieta koordinatės x ašyje. Be to, tikimybė aptikti defektą, naudojant nefokusuotą keitiklį, stipriai priklauso nuo keitiklio pasvirimo kampo. Taip yra todėl, nes keitiklio spinduliuojama ultragarso banga, toldama nuo keitiklio, sklaidosi, todėl signalas atsispindi ne tik nuo klijų sluoksnyje esančio defekto, bet ir nuo ribos tarp klijų sluoksnio bei aliuminio lydinio plokštelės.

35 pav. vaizduojami tyrimo jautrumui įtaką turintys parametrai, kai tyrimas atliekamas su fokusuotu keitikliu.

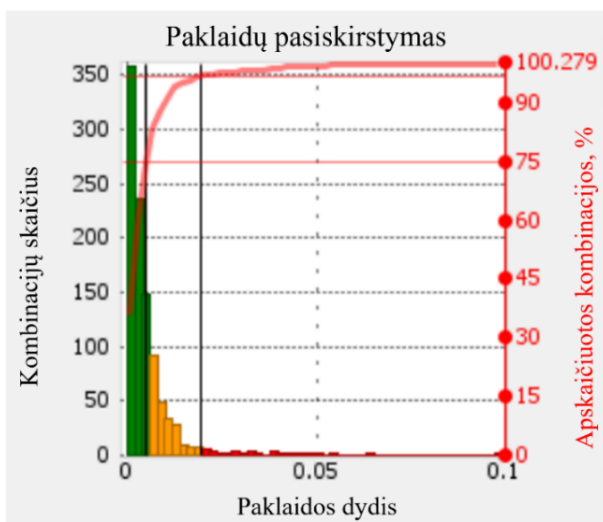


35 pav. Parametrų įtaka tyrimo jautrumui, kai keitiklis fokusuotas

Kaip matoma, didžiausią 66,16 % įtaką tyrimo jautrumui turi keitiklio padėtis bandinio x koordinatės ašies atžvilgiu. Tai reiškia, kad defekto aptikimo tikimybė labai priklauso nuo šio parametro. Taip pat didelę 17,09 % įtaką turi pačio defekto dydis. Mažiausias įtakos defektų aptikimui turi aliuminio lydinio plokštelės storis, klijų sluoksnio storis, signalo greitis, atstumas tarp bandinio ir keitiklio, defekto padėtis gylyje bei pasvirimo kampas. Šių parametrų jautrumas atitinkamai lygus 2,62 %, 2,88 %, 2,67 %, 2,84 %, 3,06 %, 3,06 %. Galima teigti, kad defekto aptikimo tikimybę lemia defekto dydis ir padėtis x koordinatės ašies atžvilgiu, nes nuo to priklauso, ar defektas atspindės signalą. Naudojant fokusuotą keitiklį, jo pasvirimo kampas neturi didelės įtakos defekto aptikimui, nes fokusuotas signalas sklinda ir atsispindi tik nuo tos vietos, į kurią jis yra nukreiptas.

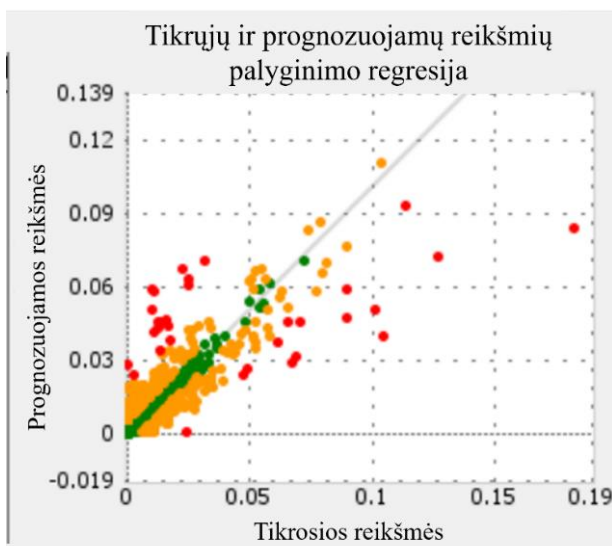
Metamodelio tikslumui įvertinti naudojama „Kryžminio patvirtinimo“ metodika. Ši metodika leidžia statistiškai įvertinti modelio tikslumą.

Paklaidų pasiskirstymo grafiko (žr. 36 pav.) horizontalioje ašyje yra nurodytos skaičiavimų, kai naudojamas nefokusuotas keitiklis, santykinų paklaidų reikšmės. Kairėje pusėje esanti vertikalioji ašis žymi kombinacijų, turinčių tam tikrą paklaidą, skaičių, o dešinėje – apskaičiuotų kombinacijų procentinę dalį.



36 pav. Paklaidų pasiskirstymas, kai keitiklis nefokusuotas

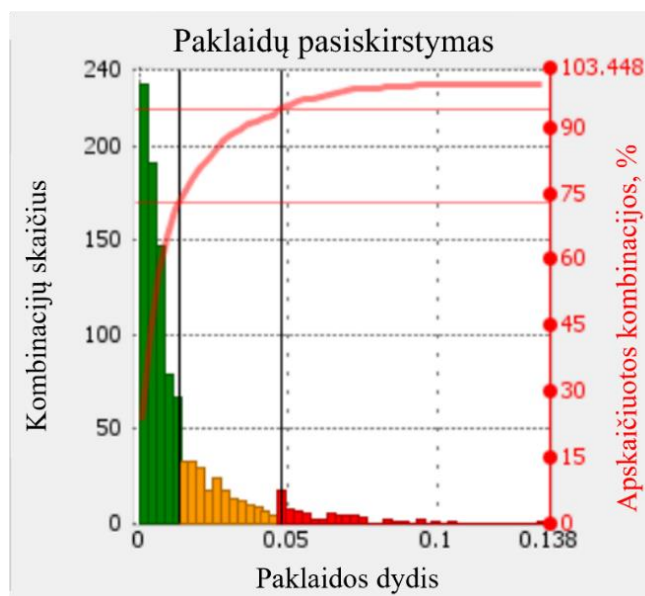
Galima pastebėti, kad 74,93 % metamodelio rezultatų gauti su mažesne nei 0,005 santykinė paklaida (žali stulpeliai). Atvejų, kurių santykinė paklaida yra didžiausia (oranžiniai ir geltoni stulpeliai), dažniausiai generuoja silpnas signalo reikšmes ir jų yra santykinai nedaug. Šiuo atveju vidutinė santykinė paklaida, kuri yra mažesnė už 0,02, bet didesnė už 0,005, sudaro 3,06 % metamodelio rezultatų. O didesnes už 0,02 santykinės paklaidas turi 22,01 % metamodelio rezultatų.



37 pav. Tikrųjų ir prognozuojamų reikšmių palyginimo regresijos grafikas, kai keitiklis nefokusuotas

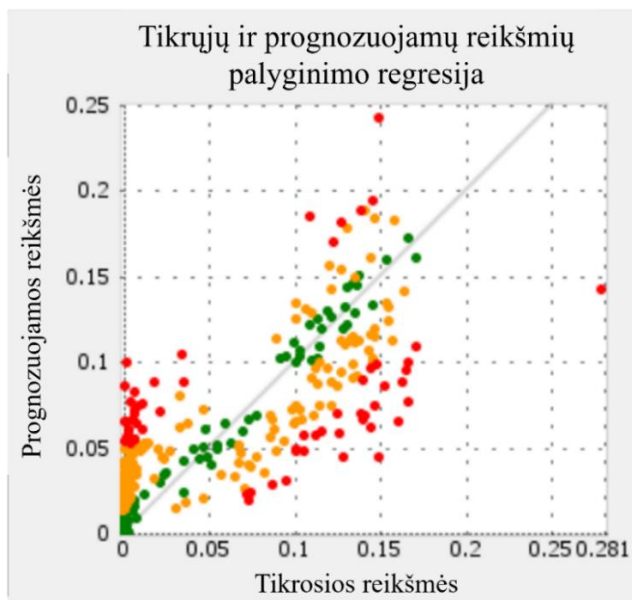
37 pav. grafiko x ašyje yra vaizduojamos tikrosios reikšmės, kurios yra numatytosios. O y ašyje vaizduojamos modelio prognozuojamos reikšmės. Pilka tiesė vaizduoja idealų modelį, todėl tikrųjų ir prognozuojamų verčių poros turi būti kuo arčiau šios tiesės. Be to, raudoni taškai žymi reikšmes, kurios turi dideles paklaidas, geltoni – vidutines, o žali – tikslus arba beveik tikslus rezultatus.

Akivaizdu, kad šiuo atveju daugiausia yra tikslių ir beveik tikslių rezultatų, kurie yra išsidėstę arti idealaus modelio verčių.



38 pav. Paklaidų pasiskirstymas, kai keitiklis fokusuotas

Įvertinant medamodelio tikslumą, kai naudojamas fokusuotas keitiklis (žr. 38 pav.), pastebima, kad 72,99 % metamodelio rezultatų turi mažesnę nei 0,013 santykinę paklaidą. Tai reiškia, kad 27,01 % metamodelio rezultatų (5,55 % metamodelio rezultatų turi vidutinę santykinę paklaidą, kurios vertė yra tarp 0,013 ir 0,048, o 21,46 % – didelę (didesnę už 0,048) santykinę paklaidą) generuoja silpnas signalo reikšmės. Galima teigti, kad tokių signalų gaunama santykinai mažai.



39 pav. Tikrųjų ir prognozuojamų reikšmių palyginimo regresijos grafikas, kai keitiklis fokusuotas

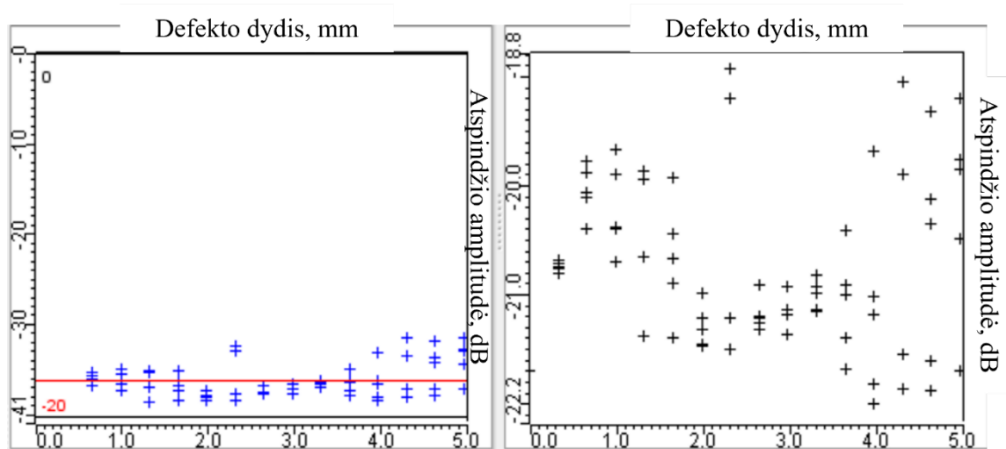
Naudojant fokusuotą keitiklį, tikrųjų ir prognozuojamų reikšmių palyginimo regresijos grafike (žr. 39 pav.) pastebima, kad didžioji dalis rezultatų yra šalia idealaus modelio verčių (pilka tiesė). Galima teigti, kad toks metamodelis yra tinkamas naudojimui.

Taigi gauta, kad, tiriant klijuotų jungčių klijų sluoksnio vientisumą nefokusuotu keitikliu, didelę įtaką defekto aptikimui turi keitiklio padėtis x koordinatės ašies atžvilgiu ir jo pastatymo kampas bei klijuose esančio defekto dydis, o 74,93 % metamodelio rezultatai yra gauti su mažomis paklaidomis, tačiau paklaidų skaičius ir vertė didėja, kai analizuojamos didesnės tikrosios ir prognozuojamos vertės. Dideles santykinės paklaidas turi 22,01 % metamodelio rezultatų. Atliekant tą patį tyrimą su nefokusuotu keitikliu, įtaką defekto aptikimui turi tik keitiklio padėtis x koordinatės ašies atžvilgiu ir defekto dydis. Vadinasi, keitiklio pastatymo kampas neturi didelės įtakos defekto aptikimui, kai naudojamas fokusuotas keitiklis. Be to, naudojant šį keitiklį, 73,99 % metamodelio rezultatų turi mažas santykinės paklaidas, tačiau 21,46 % metamodelio rezultatų generuoja dideles santykinės paklaidas. Tai yra 0,55 % mažiau rezultatų su didelėmis paklaidomis nei tyrimo, kurio metu yra naudojamas nefokusuotas keitiklis.

3.4. Defekto aptikimo tikimybė

Defekto aptikimo tikimybės nustatymui, kai tyrimas atliekamas su nefokusuotu keitikliu, analizuojamos 16 skirtingų defektų dydžių, atliekant po 5 papildomus skaičiavimus kiekvienam to dydžio defektui. Kiti kintamieji parametrai atitinka parametrus, naudotus jautrumo nustatymui (6 lentelė). Skaičiavimai atliekami remiantis Monte Karlo metodu, kurio metu yra modeliuojami atsitiktiniai scenarijai ir apskaičiuojamos jų vidutinės reikšmės. Taip gaunama defekto aptikimo tikimybės kreivė, kuri parodo defekto aptikimo tikimybę ir atliekamo imersinio ultragarsinio metodo patikimumą.

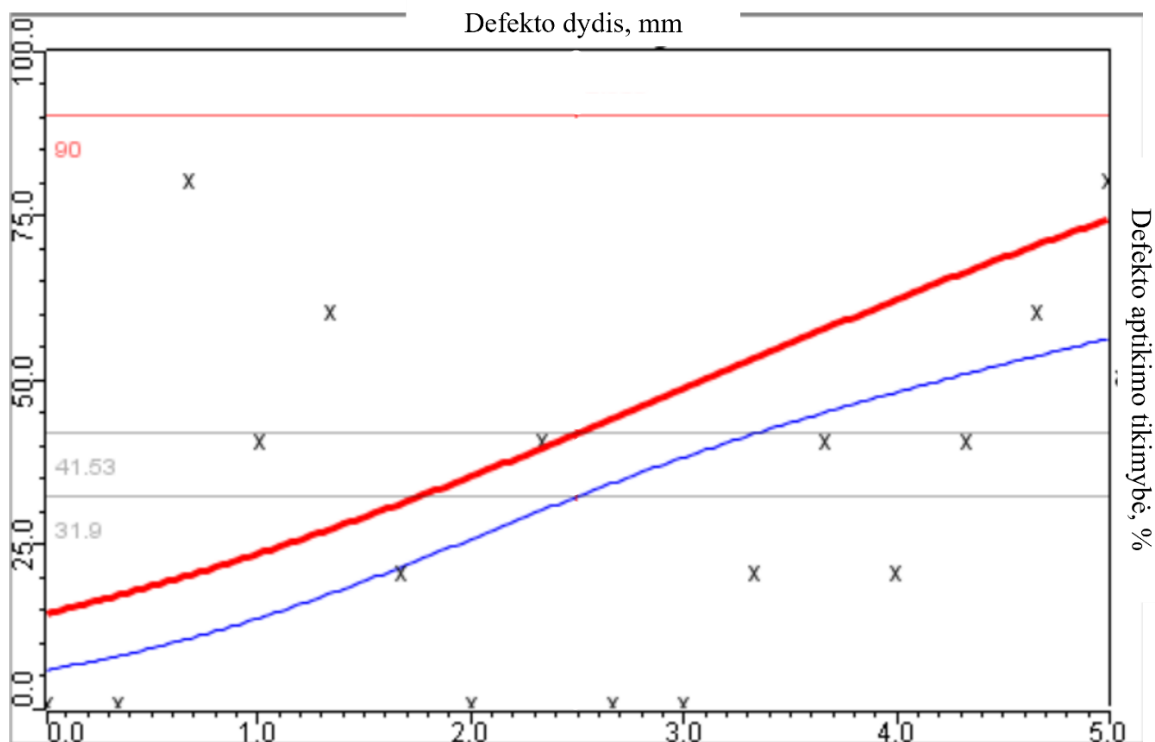
40 pav. yra pateiktos vertės, su kuriomis nustatoma defekto aptikimo tikimybė.



40 pav. Defekto aptikimo tikimybės skaičiavimuose naudojami duomenys

Kairiajame grafike yra vaizduojamos maksimalios atspindžio amplitudės nuo atitinkamo dydžio defekto. Šiuo atveju išsotrinimo slenkstis yra 0 dB. Signalai, pasiekę šią ribą, yra iškraipyti ir netinkami defekto aptikimo tikimybės vertinimui. Triukšmo lygis parenkamas lygus -68 dB. Šis lygis apibrėžia sistemos foninio triukšmo lygį. Jei atspindėtas signalas yra mažesnis už šią ribą, tai toks signalas galimai atsispindi nuo kitų paviršių, todėl sumažėja tikimybė aptikti defektą. O defektų aptikimo lygis, apibrėžiantis minimalų atspindėto signalo stiprumą, yra -20 dB. Dešinėje pusėje vaizduojami nustatytose ribose esantys defektai. Patikimumo lygis yra 95 %.

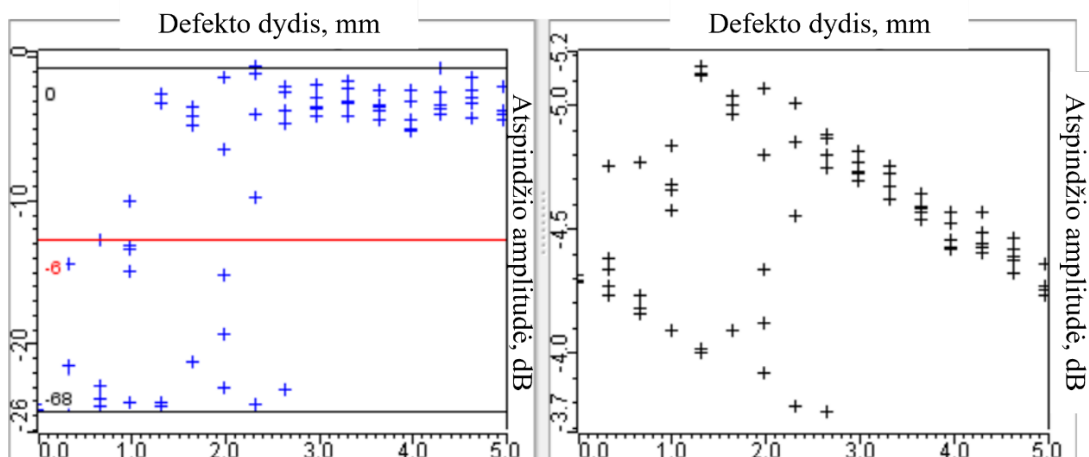
41 pav. vaizduoja defekto aptikimo tikimybės kreivę, kai bandinys tiriamas nefokusuotu keitikliu.



41 pav. Defekto aptikimo tikimybės kreivė, kai naudojamas nefokusuotas keitiklis

Horizontalioje ašyje pateiktas defekto dydis, o vertikalioje – aptikimo tikimybė procentais. Raudona kreivė atitinka apskaičiuotą defekto aptikimo tikimybę, kuri priklauso nuo defekto dydžio. Mėlyna kreivė žymi 95 % patikimumo ribą, kuri užtikrina, kad tikroji defekto aptikimo tikimybė yra ne mažesnė už šią ribą. Horizontali raudona tiesė žymi 90 % defekto aptikimo tikimybės ribą, kuri užtikrina modelio patikimumą. Matoma, kad, atliekant ultragarsinį tyrimą su nefokusuotu keitikliu, nėra apsiekiama 90 % defekto aptikimo tikimybė. Tikimybė, kad bus aptiktas 5 mm dydžio defektas, yra tik apie 75 %. Galima konstatuoti, kad tyrimas, naudojant nefokusuotą keitiklį, yra nepatikimas, nes tikimybė aptikti nedidelio dydžio defektus klijautoje jungtyje yra maža.

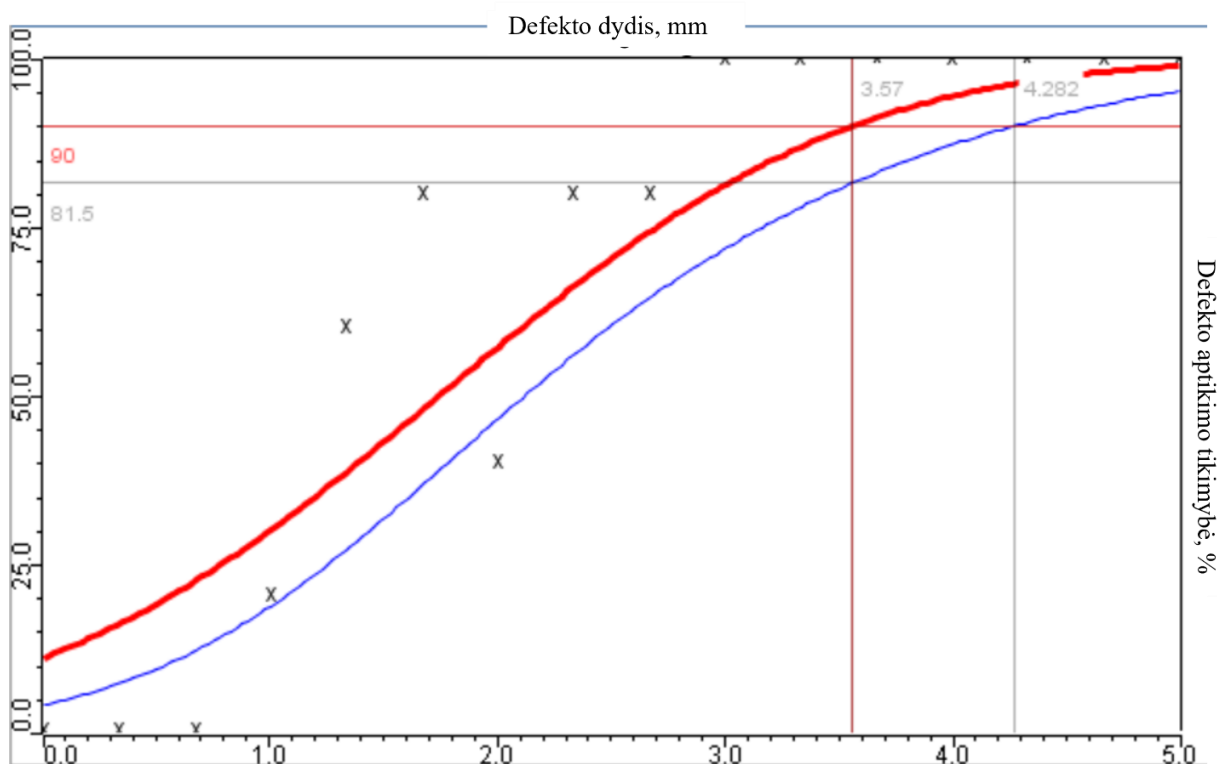
Nustatomos atspindžių amplitudžių ribos defektų aptikimo tikimybės skaičiavimui, kai naudojamas fokusuotas keitiklis (žr. 42 pav.).



42 pav. Defekto aptikimo tikimybės kreivė, kai naudojamas fokusuotas keitiklis

Atliekant defekto aptikimo tikimybės skaičiavimą, kai naudojamas fokusuotas keitiklis, defekto įsisotinimo ir triukšmo lygiai, kaip ir prieš tai nagrinėtu atveju, yra 0 dB ir -68 dB. Tačiau parenkama aukštesnė defekto aptikimo riba. Ji šiuo atveju yra lygi -6 dB, o patikimumo lygis – 95 %.

Defekto aptikimo tikimybės kreivė, kai atliekamas tyrimas su fokusuotu keitikliu, yra pateikta 43 pav.



43 pav. Defekto aptikimo tikimybės kreivė, kai naudojamas fokusuotas keitiklis

Matoma, kad yra pasiekama 90 % defekto aptikimo tikimybės riba. Ši tikimybė yra pasiekama, kai defekto dydis lygus 3,57 mm. O 90 % tikimybė aptikti defektą su 95 % patikimumo riba yra

pasiekama, kai defektas yra 4,28 mm dydžio. Galima teigti, kad fokusuotas keitiklis, tiriant plonas struktūras, užtikrina mažų defektų aptikimą.

Apibendrinant galima teigti, kad naudojant fokusuoto tipo keitiklį, išauga tikimybė aptikti smulkius defektus klijuotų sujungimų klijų sluoksnyje. Defektai, kurių dydis 3,57 mm, turi 90 % aptikimo tikimybę, kai naudojamas fokusuotas keitiklis. Naudojant nefokusuotą keitiklį, ši aptikimo tikimybė nėra pasiekama. Dėl šios priežasties, norint patikrinti klijuotų jungčių vientisumą, ultragarsinį tyrimą reikia atlikti su fokusuoto tipo keitikliu.

Išvados

1. Apžvelgti neardomosios kontrolės metodai, kurie taikomi klijuotų sujungimų tyrimui. Pastebėta, kad, taikant ultragarsinį metodą, galima aptikti įvairius klijuotų jungčių defektus: nesukibimus, inkliuzus, tuštumas.
2. Sukurtas kompiuterinis klijuoto sujungimo modelis CIVA 2021 programinėje įrangoje, kuris leidžia sumodeliuoti imersinį ultragarsinį tyrimą, naudojant fokusuotą bei nefokusuotą keitiklius, pamatyti tiriamojo objekto A, B ir C tipo vaizdus. Taip pat šis kompiuterinis modelis padeda nustatyti parametrus, kurie turi didžiausią įtaką tyrimo jautrumui, bei apskaičiuoti defekto aptikimo tikimybę.
3. Nustatyta, kad didžiausią įtaką defekto aptikimui turi defekto dydis, jo padėtis bandinio gylyje, ultragarso bangos sklaidimo greitis, keitiklio atstumas nuo bandinio, pasvirimo kampas ir padėtis bandinio x ašies atžvilgiu. Gauta, kad, naudojant nefokusuoto tipo keitiklį, didžiausią 37,68 % įtaką turi keitiklio padėtis x koordinatės ašies atžvilgiu, o 34,94 % įtaką turi keitiklio pastatymo kampas, 13,88 % – defekto dydis. Kai naudojamas fokusuoto tipo keitiklis, didžiausią 86,40 % įtaką turi keitiklio padėtis bandinio x koordinatės ašies atžvilgiu, 22,32 % – defekto dydis.
4. Įvertinta defektų aptikimo tikimybė imersinio ultragarso tyrimo metu, kai jis atliekamas su nefokusuotu ir fokusuotu keitikliu. Gauta, kad, naudojant nefokusuoto tipo keitiklį, nėra pasiekama 90 % defekto aptikimo tikimybė, kai defektas yra mažesnis už 5 mm. O naudojant fokusuotą keitiklį 90 % tikimybė jį aptikti pasiekama, kai defekto dydis yra 3,57 mm. Taip pat naudojant tokio tipo keitiklį pasiekama 90 % tikimybė su 95 % patikimumo riba, kai defekto dydis yra 4,28 mm. Galima teigti, kad, tiriant plonų struktūrų klijuotas jungtis, geriau naudoti fokusuotą keitiklį, nes jo naudojimas padidina tikimybę aptikti mažesnio dydžio defektus.

Literatūros sąrašas

1. D. Smagulova, B. Yilmaz, and E. Jasiuniene, "Ultrasonic Features for Evaluation of Adhesive Joints: A Comparative Study of Interface Defects," *Sensors*, vol. 24, p. 176, Dec. 2023, doi: 10.3390/s24010176.
2. G. A. Bhat, D. Smagulova, and E. Jasiuniene, "Improved Defect Sizing in Adhesive Joints Through Feature-Based Data Fusion," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 44, Jan. 2025, doi: 10.1007/s10921-024-01146-w.
3. H. Jansen, B. Elburg, E. Veen, and D. Platenkamp, *Ultrasonic Frequency Analysis of Adhesively Bonded Joints*. 2025. doi: 10.3390/engproc2025090020.
4. D. Smagulova, L. Mazeika, and E. Jasiuniene, "Novel Processing Algorithm to Improve Detectability of Disbonds in Adhesive Dissimilar Material Joints," *Sensors*, vol. 21, p. 3048, Apr. 2021, doi: 10.3390/s21093048.
5. P. Russo, I. Papa, and V. Lopresto, "Mechanical Properties and Non-Destructive Evaluations of Joints Based on Polymer Composites," in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2021. doi: 10.1016/B978-0-12-819724-0.00062-8.
6. D.-J. Kwon, J. Park, and H.-M. Yoo, "Enhanced Mechanical Joining between Carbon-Fiber-Reinforced Plastic and Steel Plates Using the Clearance-Filling Effect of Structural Adhesive," *Applied Sciences*, vol. 13, p. 4332, Mar. 2023, doi: 10.3390/app13074332.
7. "https://compositesuk.co.uk/wp-content/uploads/2021/12/Joining-Good-Practice-Guide-FINAL.pdf." Accessed: Mar. 12, 2025. [Online]. Available: <https://compositesuk.co.uk/wp-content/uploads/2021/12/Joining-Good-Practice-Guide-FINAL.pdf>
8. "7.1.5 Main Takeaways on Mechanically fastened joints," TU Delft OCW. Accessed: Mar. 12, 2025. [Online]. Available: <https://ocw.tudelft.nl/course-readings/7-1-5-main-takeaways-on-mechanically-fastened-joints/>
9. M. Bajgholi, G. Rousseau, M. Viens, D. Thibault, and M. Gagnon, "Reliability assessment of non-destructive testing (NDT) for the inspection of weld joints in the hydroelectric turbine industry," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. <https://rdcu.be/dkIwL>, Aug. 2023, doi: 10.1007/s00170-023-12176-5.
10. "Different Types Of Welding Joints." Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <http://industrial.store.shoppiko.com/blog/article/different-types-of-welding-joints>
11. M. Bakała, "Industrial Soldering Process Simulator," *Applied Sciences*, vol. 13, p. 12542, Nov. 2023, doi: 10.3390/app132312542.
12. E. Marques, R. Carbas, A. Akhavan-Safar, A. Tenreiro, and L. F. M. Silva, *Structural Adhesive Bonding in Aerospace Applications*. 2022.
13. "(PDF) Optimal Selection for Dissimilar Materials using Adhesive Bonding and Mechanical Joining," ResearchGate. Accessed: Mar. 17, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/330424344_Optimal_Selection_for_Dissimilar_Materials_using_Adhesive_Bonding_and_Mechanical_Joining
14. Y. Ezziani, P. Maréchal, M. Ech-Cherif El-Kettani, D. Leduc, M. Ducouso, and N. Cuvillier, *High-resolution ultrasonic characterization of an adhesive film in an aeronautical assembly*. 2024.
15. P. Kraisornkachit, M. Naito, C. Kang, and C. Sato, "Multi-Objective Optimization of Adhesive Joint Strength and Elastic Modulus of Adhesive Epoxy with Active Learning," *Materials*, vol. 17, p. 2866, Jun. 2024, doi: 10.3390/ma17122866.
16. M. Ueda, V. Cuong, A. Yamanaka, and K. Sakata, "Tensile, compressive, and fatigue strength of a quasi-isotropic carbon fiber reinforced plastic laminate with a punched hole," *Heliyon*, vol. 6, p. e05690, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05690.

17. W. Hardi and R. Hartono, "Effect of Lap Joint Width to the Shear and Peel Stress Distribution of Bi-Adhesive," *E3S Web of Conferences*, vol. 328, p. 07015, Jan. 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202132807015.
18. R. .B, S. Chinnathambi, N. E, and H. R, "Mechanical Characterization of Adhesive in Lap Joint Under Tensile Load," *Journal of Polymer & Composites*, vol. 11, pp. S96–S103, Mar. 2024.
19. P. Bhuse, *Stress Analysis and Strength Evaluation of Scarf Adhesive Joint*. 2018.
20. A. K. Basak, D. Bajwa, and A. Pramanik, "Fatigue Behaviour of Mechanical Joints: A Review," *Metals*, vol. 15, p. 25, Dec. 2024, doi: 10.3390/met15010025.
21. M. Abbas, N. Sakundarini, and I. Kong, "Optimal Selection for Dissimilar Materials using Adhesive Bonding and Mechanical Joining," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 469, p. 012051, Jan. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/469/1/012051.
22. A. Güemes, A. Pozo-morales, A. Fernandez-Lopez, X. F. Sánchez-romate, M. Sánchez, and A. Ureña, "Strain and damage sensing by CNT modified adhesive films and fiber optic distributed sensing. Comparison of performances in a double lap bonded joint," *e-Journal of Nondestructive Testing*, vol. 25, no. 02, Feb. 2020, Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.ndt.net/search/docs.php3>
23. E. Jasiūnienė *et al.*, "Non-Destructive Evaluation of the Quality of Adhesive Joints Using Ultrasound, X-ray, and Feature-Based Data Fusion," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 24, p. 12930, Dec. 2022, doi: 10.3390/app122412930.
24. University of Stuttgart *et al.*, "Investigation of Kissing Bonds in Adhesive Joints," *ReJNDT*, vol. 1, no. 1, Aug. 2023, doi: 10.58286/28226.
25. S. Heide-Jørgensen, S. Teixeira de Freitas, and M. Budzik, "On the fracture behaviour of CFRP bonded joints under mode I loading: Effect of supporting carrier and interface contamination," *Composites Science and Technology*, vol. 160, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.compscitech.2018.03.024.
26. B. Yılmaz, A. Ba, E. Jasiuniene, and G. Berthiau, "Evaluation of Bonding Quality with Advanced Nondestructive Testing (NDT) and Data Fusion," *Sensors*, vol. 20, Sep. 2020, doi: 10.3390/s20185127.
27. W. Sun *et al.*, "Review of high energy x-ray computed tomography for non-destructive dimensional metrology of large metallic advanced manufactured components," *Reports on Progress in Physics*, vol. 85, p. 016102, Feb. 2022, doi: 10.1088/1361-6633/ac43f6.
28. "The Role of Non-Destructive Testing of Composite Materials for Aerospace Applications." Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2813-477X/3/1/3>
29. N. Liu, S. Shen, Y. Zhu, Y. Gao, and Y. Pan, "Debonding Detection of Thin-Walled Adhesive Structure by Electromagnetic Acoustic Resonance Technology," *Materials*, vol. 17, p. 5073, Oct. 2024, doi: 10.3390/ma17205073.
30. H. Sun, H. Kosukegawa, T. Takagi, T. Uchimoto, M. Hashimoto, and N. Takeshita, "Electromagnetic pulse-induced acoustic testing and the pulsed guided wave propagation in composite/metal adhesive bonding specimens," *Composites Science and Technology*, vol. 201, p. 108499, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.compscitech.2020.108499.
31. J. Kowalczyk, M. Jósko, D. Wiczorek, K. Sędlak, and M. Nowak, "Study of the Kinetics of Adhesive Bond Formation Using the Ultrasonic Method," *Applied Sciences*, vol. 14, p. 163, Dec. 2023, doi: 10.3390/app14010163.
32. J. Kowalczyk and M. Jósko, "Strength and Ultrasonic Testing of Acrylic Foam Adhesive Tape," *Applied Sciences*, vol. 14, pp. 1–16, Aug. 2024, doi: 10.3390/app14166877.
33. F. Bu *et al.*, "Research on the Weakening Process at the Interface of Bonded-Layer Composite Structures Using Ultrasonic Longitudinal Waves," *Coatings*, vol. 15, p. 151, Jan. 2025, doi: 10.3390/coatings15020151.
34. V. Samaitis, E. Jasiuniene, P. Packo, and D. Smagulova, "Ultrasonic Methods," 2021, pp. 87–131. doi: 10.1007/978-3-030-72192-3_5.

35. V. Giurgiutiu, "Structural health monitoring and nondestructive evaluation applications of the stress, vibration, and wave analysis in aerospace composites*," in *Stress, Vibration, and Wave Analysis in Aerospace Composites*, V. Giurgiutiu, Ed., Academic Press, 2022, pp. 807–888. doi: 10.1016/B978-0-12-813308-8.00010-7.
36. B. Mina, "Radiography or Ultrasonic testing? Which one is better?," Jul. 2021.
37. "Immersion Transducers | Evident Scientific." Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://ims.evidentscientific.com/en/probes/single-and-dual-element/immersion-transducers>
38. Y. Li, Y. Lyu, B. Wu, J. Gao, Z. Bian, and C. He, "Experimental Investigation of Bonding Quality for CFRP Bonded Structures with Thick Adhesive Layers Based on Ultrasonic Transmission Coefficient Spectrums," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 43, Dec. 2023, doi: 10.1007/s10921-023-01029-6.
39. N. Blackman, B. Blandford, and D. Jack, "Comparison of Immersion and Portable Ultrasonic Housing to Quantify the Adhesive Bond Thickness and Sizing of Foreign Objects," *Materials*, vol. 17, p. 5111, Oct. 2024, doi: 10.3390/ma17205111.
40. D. Smagulova, V. Samaitis, and E. Jasiuniene, "Convolutional Neural Network for Interface Defect Detection in Adhesively Bonded Dissimilar Structures," *Applied Sciences*, vol. 14, p. 10351, Nov. 2024, doi: 10.3390/app142210351.
41. B. Yilmaz, A. Asokkumar, E. Jasiuniene, and R. Kazys, "Air-Coupled, Contact, and Immersion Ultrasonic Non-Destructive Testing: Comparison for Bonding Quality Evaluation," *Applied Sciences*, vol. 2020, p. 6757, Sep. 2020, doi: 10.3390/app10196757.
42. K. Yadav, S. Yadav, and P. K. Dubey, "A Comparative Study of Ultrasonic Contact and Immersion Method for Dimensional Measurements," *MAPAN-Journal of Metrology Society of India*, May 2021, doi: 10.1007/s12647-021-00452-2.
43. Y. Wang, P. Li, and J. Li, "The monitoring approaches and non-destructive testing technologies for sewer pipelines," *Water Science and Technology*, vol. 85, Apr. 2022, doi: 10.2166/wst.2022.120.
44. V. Samaitis, B. Yilmaz, and E. Jasiuniene, "Adhesive bond quality classification using machine learning algorithms based on ultrasonic pulse-echo immersion data," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 546, p. 117457, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jsv.2022.117457.
45. H. Yu, "Scanning acoustic microscopy for material evaluation," *Applied Microscopy*, vol. 50, Dec. 2020, doi: 10.1186/s42649-020-00045-4.
46. J. Jodhani, A. Handa, A. Gautam, Ashwni, and R. Rana, "Ultrasonic non-destructive evaluation of composites: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 78, pp. 627–632, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.12.055.
47. F. Simonetti, "Cryo-ultrasonic testing of curved components," *NDT & E International*, vol. 137, p. 102835, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.ndteint.2023.102835.
48. Polymer Competence Center Leoben GmbH *et al.*, "XCT inspection in bonded aircraft repairs for composites," *eJNDT*, vol. 25, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.58286/25097.
49. The Manufacturing Technology Centre (MTC), N. Brierley, The Manufacturing Technology Centre (MTC), N. Turner, German Center for Cancer Research (DKFZ), and M. Kachelrieß, "Graded Material Inspection by X-ray Computed Tomography," *eJNDT*, vol. 25, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.58286/25093.
50. B. Hena, G. Ramos, C. Ibarra-Castanedo, and X. Maldague, "Automated Defect Detection through Flaw Grading in Non-Destructive Testing Digital X-ray Radiography," *NDT*, vol. 2, no. 4, Art. no. 4, Dec. 2024, doi: 10.3390/ndt2040023.
51. U. Caligulu, M. Taskin, and M. Türkmen, "TASKIN, M., CALIGULU, U., TURKMEN, M., 'X-Ray Tests of AISI 430 and 304 Stainless Steels and AISI 1010 Low Carbon Steel Welded by CO2 Laser Beam Welding', MP-Materials Testing-Materials and Components Technology and Application, 53 (11-12), 741-747, 2011.," vol. 53, pp. 741–747, Jan. 2011.

52. V. Dumont, C. Badulescu, J. Adrien, N. Carrere, D. Thévenet, and E. Maire, “Experimental investigation of porosities evolution in a bonded assembly by means of X-ray tomography,” *The Journal of Adhesion*, vol. 97, pp. 1–25, Nov. 2019, doi: 10.1080/00218464.2019.1685984.
53. “(PDF) Phase Reversal Method for Damage Imaging in Composite Laminates Based on Data Fusion,” ResearchGate. Accessed: Apr. 29, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/359181498_Phase_Reversal_Method_for_Damage_Imaging_in_Composite_Laminates_Based_on_Data_Fusion
54. E. Ginzel, “Simulation of Acoustic Property Determination Using Civa 2021”.