

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

AUDRIUS JANKAUSKAS

**ULTRAGARSINIS METODAS TALPYKLŲ DUGNO DEFEKTŲ
PARAMETRAMS MATUOTI**

Daktaro disertacijos santrauka

Technologijos mokslai, matavimų inžinerija (10T)

2017, Kaunas

Daktaro disertacija rengta 2011–2017 m. Kauno technologijos universitete, Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institute.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Liudas MAŽEIKA (Kauno technologijos universitetas, technologiniai mokslai, matavimų inžinerija – 10T)

Matavimų inžinerijos (10T) mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Prof. dr. Vaidotas MAROZAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija – 10T) – **pirmininkas**;

Doc. dr. Elena JASIŪNIENĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T);

Doc. dr. Paulius KAŠKONAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija – 10T);

Prof. habil. dr. Genadijus KULVIETIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T);

Doc. dr. Alberto RODRIGUEZ MARTINEZ (Elčės Migelio universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Lietuvių kalbos redaktorė:

Aurelija Gražina Rukšaitė

Disertacija bus ginama viešame Matavimų inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2017 m. spalio 9 d. 12 val. Kauno technologijos universiteto centrinių rūmų disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73–403, LT-44249, Kaunas, Lietuva

Tel. (+370) 37 30 00 42, faksas (+370) 37 32 41 44, el. paštas: doktorantura@ktu.lt

Disertacijos santrauka išsiųsta 2017 m. rugsėjo 8 d.

Disertaciją galima peržiūrėti internete <http://ktu.edu> ir Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, LT-44239, Kaunas, Lietuva)

IVADAS

Nagrinėjamos problemos aktualumas

Korozijos sukeltų defektų aptikimas ir jų pokyčių įvertinimas yra itin svarbus naftos ir chemijos pramonėje. Dėl šios priežasties, siekiant užtikrinti aukštą saugumo lygį bei patikimumą, talpyklos ir jų dugnas turi būti periodiškai tikrinami, kad būtų išvengta korozijos sukeltų nelaimingų atsitikimų, kai pavojingos cheminės medžiagos gali patekti į aplinką ar gruntinius vandenius. Dėl to tiriant konstrukcinius elementus naftos ir chemijos pramonėje yra taikoma keletas neardomųjų bandymų metodų, tokių kaip kapiliariniai [1], magnetiniai [1–4], sūkurinių srovių [1, 5, 6], termografiniai [7, 8], rentgenografiniai [9], akustinės emisijos [10–12] bei ultragarsiniai tyrimų metodai [1, 13, 14]. Pagrindinė problema, su kuria susiduriama atliekant konstrukcinių elementų patikrą naftos ir cheminių produktų pramonėje, konkrečiai – atliekant talpyklų dugno tyrimus, yra tai, kad daugeliu atvejų, taikant įprastinius neardomųjų bandymų metodus, talpyklos visų pirma turi būti ištuštinamos ir išvalomos, užtikrinamas patikrą iš vidaus atliekančio operatoriaus saugumas prieš atliekant visas būtinas patikros procedūras. Kartu tai nulemia dideles tiek finansines, tiek laiko sąnaudas, būtinas šioms operacijoms atlikti. Siekiant to išvengti, akustinės emisijos matavimo metodas, kaip papildomas matavimo metodas, yra taikomas talpyklų operatorių, siekiant gauti papildomą informaciją apie galimą talpyklų koroziją ar laikomų produktų nuotėkį, neištuštinant talpyklų. Vis dėlto talpyklų patikrai atlikti taikomas akustinės emisijos matavimo metodas yra jautrus foniniam triukšmui ir kartais nepraktiškas naudojimo požiūriu [10–12, 15, 16]. Dėl šios priežasties turi būti sukurtas naujas ir efektyvesnis neardomųjų bandymų metodas talpyklų dugnui tirti, defektams, jų vietai ir parametrams nustatyti, neištuštinant talpyklų.

Daugiausia žadantis neardomųjų bandymų metodas, leidžiantis atlikti matavimus sąlyginai dideliais nuotoliais (iki 100 m), kuris galėtų būti panaudotas talpyklų dugnui tirti atliekant matavimus tik ant išorinių talpyklos kraštų, yra ultragarsinis matavimo metodas, paremtas nukreiptųjų bangų taikymu. Skirtingai nuo įprastinių neardomųjų bandymų metodų, tyrimų metu taikant nukreiptąsias ultragarso bangas, nėra būtinybės atlikti viso objekto skenavimą lokaliai, kaip kad taikant tradicinius storio matavimo metodus. Naudojant nukreiptąsias ultragarso bangas, pakanka keitikius išdėstyti lengvai prieinamose vietose, kad visas objekto segmentas būtų ištirtas vienu metu, kaip tai buvo sėkmingai pademonstruota atliekant vamzdžių [17–20], bėgių [21, 22] ir plieninių lynų [23, 24] tyrimus korozijos sukeltiems defektams aptikti. Paprastai šių objektų tyrimai yra atliekami taikant atspindžio matavimo režimą, kai defekto vietos įvertinimas yra atliekamas tiksliai matuojant nuo defekto atspindėto signalo sklidimo trukmę. Šiuo atveju talpyklų dugno tyrimais yra siekiama gauti erdvinį jame esamų defektų pasiskirstymą. Šių nukreiptųjų ultragarso bangų pritaikomumas dugnui tirti ir sąveika su jo konstrukciniais elementais buvo nagrinėtas keliuose darbuose [25–

29]. Vis dėlto, atlikus bandomuosius talpyklos tyrimus, buvo gautas tik erdvinis slopinimo pasiskirstymas talpyklos dugne, neįvertinant absoliutinių slopinimo verčių, kurios galėtų būti tiesiogiai susietos su bendru korozijos lygiu talpyklos dugne. Remiantis anksčiau pateiktais tyrimų rezultatais galima teigti, kad, naudojant nukreiptąsias ultragarso bangas, talpyklų dugno patikra gali būti atliekama išdėstant keitikius ant išorinių talpyklos kraštų ir kartu, panaudojant tomografinius rekonstrukcinius algoritmus, galima atkurti defektų erdvinį pasiskirstymą talpyklos dugne. Pagrindiniai šių bangų privalumai yra tai, kad jos gali sklirti dideliais nuotoliais esant sąlyginai mažiems sklidimo nuostoliams, mažas jautrumas objekto kreivumui, didelis modų skaičius, leidžiantis pasirinkti tinkamiausią jų, ir t. t. Tačiau panaudoti nukreiptąsias ultragarso bangas yra sudėtinga dėl šių bangų dispersijos, modų transformacijos ties lakštinių plokščių sujungimais, objekto nevienalytiškumų ir dėl bangos energijos ištekėjimo į supančią aplinką [30–32]. Matavimus taip pat apsunkina didelis talpyklos dugną sudarančių plokščių suvirinimo siūlių skaičius. Todėl šiuo metu ypač aktualu pasiūlyti ir ištirti ultragarsinį matavimo metodą, kuris įgalintų atlikti talpyklų dugno tyrimą jų neištuštinant ir neišvalant.

Mokslinė-technologinė problema ir darbinė hipotezė

Šiame darbe sprendžiama mokslinė-technologinė problema: kaip būtų galima įvertinti naftos ir chemijos pramonėje naudojamų talpyklų dugno korozijos pažeidimų lygį, esant priėjimui tik iš tiriamo objekto išorės.

Iš problemos suformuluojama darbinė hipotezė, teigianti, kad korozijos pažeidimų lygiui nustatyti, esant priėjimui tik iš talpyklos išorės, galima panaudoti ultragarso nukreiptąsias bangas, kartu taikant tomografinius rekonstrukcinius algoritmus.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas – sukurti ir ištirti ultragarsinį matavimo metodą, įgalinantį aptikti ir įvertinti korozijos sukeltus defektus lakštinėse talpyklų dugno konstrukcijose neištuštinant ir neišvalant talpyklų.

Šiam tikslui pasiekti suformuluoti tokie uždaviniai:

1. Defektų paieškos talpyklų lakštinėse dugno konstrukcijose ir jų parametru matavimo metodų apžvalga.
2. Nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo talpyklos dugnu ir jo konstrukciniuose elementuose skaitmeninių modelių sudarymas, galimų sklidimo nuostolių, nuotolio, skyros, jautrumo ir galimų pokyčių eksploatavimo laikotarpiu įvertinimas.
3. Eksperimentinis skaitmeninio modeliavimo metu sudarytų modelių, gautų rezultatų ir dėsningumų patikrinimas.

4. Nukreiptųjų ultragarso bangų tomografijos panaudojimo talpyklų dugno defektams aptikti tyrimas ir tomografinės rekonstrukcijos metodo optimalių parametrų parinkimas.
5. Teorinis ir eksperimentinis pasiūlyto matavimo metodo patikrinimas ir galimų matavimo neapibrėžčių įvertinimas.

Mokslinis naujumas

1. Nustatyti nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo dėsningumai ir parametrai esant tėjiniam sienelės ir dugno sujungimui ir užleistiniam sujungimui, taikomiems talpyklų dugno konstrukcijose.
2. Pakoreguotas ultragarsinės tomografijos matavimo metodas erdviniam tikrųjų slopinimo verčių atkūrimui atlikti talpyklos dugne, pagrįstas kiekvienos projekcijos optimizavimu.
3. Ultragarsinės praėjimo tomografijos metodo erdvinis jautrumas ir skyra nustatyti modeliavimu bei eksperimentiškai.

Ginti teikiami teiginiai

1. Nukreiptųjų ultragarso bangų S_0 modos sklidimo dėsningumai esant tėjiniam sienelės ir dugno sujungimui ir užleistiniam sujungimui tarp talpyklos dugną sudarančių plokščių.
2. Pakoreguotas ultragarsinės praėjimo tomografijos metodas tikrųjų slopinimo verčių erdviniam pasiskirstymui nustatyti.
3. Talpyklos dugno modelis tomografinio rekonstrukcinio algoritmo galimybės įvertinti.
4. Eksperimentiniai erdvinio slopinimo pasiskirstymo rezultatai, skyra ir jautrumas specialiai pagamintame nerūdijančio plieno bandinyje su dirbtiniais defektais.
5. Eksperimentiniai erdvinio slopinimo pasiskirstymo rezultatai sumažinto dydžio talpyklos makete gauti taikant siūlomą ultragarsinės praėjimo tomografijos metodą, esant ribotam projekcijų skaičiui.

Rezultatų apibavimas

Doktorantūros studijų laikotarpiu paskelbti 2 moksliniai straipsniai mokslinės informacijos instituto (*ISI Web of Science*) pagrindinio sąrašo leidiniuose. Perskaityti 4 pranešimai tarptautinėse mokslinėse konferencijose, kurios vyko: Palangoje, Liubline, Prahoje ir Miunchene.

Disertacijos struktūra ir apimtis

Daktaro disertaciją sudaro įvadas, 5 skyriai, išvados ir literatūros sąrašas. Bendra apimtis 142 p., juose yra pateikti 107 paveikslai, 10 lentelių, 108 matematinės išraiškos ir 178 pavadinimo literatūros sąrašas.

Pirmajame apžvalginiame skyriuje pateikiami defektų paieškos ir jų parametrų matavimo talpyklų dugne metodai, apžvelgiant jų pagrindinius trūkumus ir privalumus. Detaliau pateikiama nukreiptųjų ultragarso bangų analizė ir jų privalumai aptinkant korozijos sukeltus defektus ir kartu pateikiama taikomų tomografinių rekonstrukcinių algoritmų apžvalga.

Antrajame skyriuje pateikiamas atliktas skaitmeninis nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo sumažinto dydžio talpyklos makete ir jos konstrukciniuose elementuose, konkrečiai esant tėjinei suvirintajai jungčiai tarp talpyklos sienelės ir dugno bei užleistinei suvirintajai jungčiai tarp atskirų talpyklos dugną sudarančių metalo lakštų, modeliavimas taikant baigtinių elementų metodą. Nukreiptųjų ultragarso bangų simetrinės S_0 modos sklidimas, praėjimo nuostoliai, nulemti šių sujungimų, buvo įvertinti ir gauti skaitmeninio modeliavimo rezultatai yra pateikiami.

Trečiajame skyriuje pateikiami atliktų nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo lakštinėse konstrukcijose eksperimentinių tyrimų rezultatai, esant užleistinei suvirintajai jungčiai tarp atskirų talpyklos dugną sudarančių metalo lakštų.

Ketvirtajame skyriuje yra pateikiamas pakoreguotas ultragarsinės praėjimo tomografijos matavimo algoritmas tikrosioms slopinimo vertėms atkurti. Pateikiamas sudarytas skaitmeninis talpyklos dugno modelis sukurtam tomografiniam rekonstrukciniam algoritmui įvertinti.

Penktajame skyriuje yra pateikiami eksperimentinių tyrimų rezultatai, gauti panaudojant specialiai pagamintą nerūdijančio plieno 1 m diametro 6 mm storio apskritą bandinį su jame esančiais dirbtiniais defektais bei eksperimentinių tyrimų rezultatai, gauti atliekant 1:8 santykiu sumažinto dydžio talpyklos maketo tyrimą. Pateikiami eksperimentinių tyrimų metu, taikant pakoreguotą tomografinės rekonstrukcijos algoritmą, gauti erdviniai defektų ir nukreiptųjų ultragarso bangų slopinimo pasiskirstymo sumažinto dydžio talpyklos dugne vaizdai.

Kiekvieno skyriaus pabaigoje yra pateikiami apibendrinimai.

Darbo pabaigoje pateikiamos atliktų teorinių ir eksperimentinių tyrimų išvados, naudotos literatūros sąrašas ir mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas.

1. NEARDOMŪJŲ BANDYMŲ METODŲ, TAIKOMŲ TALPYKLŲ DUGNUI TIRTI, ANALIZĖ

Neardomųjų bandymų metodai apima plačią grupę analizės ir tyrimų metodų, taikomų pramonėje objektų savybėms ir būsenai įvertinti, jų nepažeidžiant. Kadangi talpyklos dugnas yra lakštinė struktūra, sudaryta iš didelio kiekio tarpusavyje suvirintų elektriškai laidžių plieno plokščių, jų tyrimai ir neardomieji bandymai dažniausiai yra atliekami taikant sūkurinių srovių, magnetinius, akustinės emisijos ir ultragarsinius matavimo metodus.

Talpyklos dugno patikros metu matavimai dažniausiai yra atliekami taikant impulsinį sūkurinių srovių (angl. *pulsed eddy current testing*), nuotolinio lauko sūkurinių srovių (angl. *remote field eddy current testing*) bei plačiausiai taikomą magnetinio srauto nuotėkio (angl. *magnetic flux leakage*) tyrimų metodus. Tačiau esminis šių metodų trūkumas yra tai, kad, prieš atliekant patikrą, talpyklos visų pirma turi būti ištuštinamos, kartu turi būti užtikrinamas operatoriaus, atliekančio talpyklos dugno patikrą iš vidaus, saugumas. Visi šie paminėti neardomųjų bandymų metodai leidžia atlikti matavimus tik lokaliai ir kartu nulemia dideles tiek laiko, tiek finansines sąnaudas atliekant šias procedūras. Šių matavimo metodų taikymo trūkumų (talpyklų ištuštinimo, jų išvalymo ir matavimo lokaliuose talpyklos dugno taškuose) leidžia išvengti akustinės emisijos (angl. *acoustic emission*) matavimo metodas. Tačiau šio matavimo metodo pritaikomumą talpyklų dugno defektams nustatyti riboja akustinės emisijos matavimo metodo jautrumas foniniam triukšmui, dėl ko matavimai negali būti atliekami esant tam tikroms aplinkos sąlygoms (kai yra stiprus vėjas, lietus). Be to, akustinės emisijos matavimo metodas yra pasyvus matavimo metodas, t. y. matuojamas natūralus akustinis triukšmas, atsirandantis objekte dėl mechaninių apkrovų. Be to, šiuo metodu aptiktas defektines ar įtartinas sritis vis tiek reikia tikrinti kitais neardomųjų bandymų metodais.

Daugelį šių aukščiau pateikiamų neardomųjų bandymų metodų trūkumų leidžia išvengti nukreiptųjų ultragarso bangų (angl. *ultrasonic guided waves*) panaudojimas. Šiuo metu nukreiptosios ultragarso bangos yra plačiai taikomos vidutinio ir didelio nuotolio matavimo sistemose dėl korozijos atsiradusiems defektams ir jų vietai vamzdynuose nustatyti. Šiuo atveju defekto vietos įvertinimas yra atliekamas tiksliai matuojant nuo defekto atspindėto signalo sklidimo trukmę. Tačiau nukreiptųjų ultragarso bangų praktinį taikymą riboja sudėtingi šių bangų sklidimo dėsningumai – daugiamodiškumas, fazinio ir grupinio greičių priklausomybė nuo dažnio, modų virsmas ties objekto nevienalytiškumais ir bangos energijos ištekėjimas į supančią aplinką. Taip pat vienas iš iššūkių, su kuriuo susiduriama atliekant matavimus naudojant nukreiptąsias ultragarso bangas, yra tai, kad didelio paviršiaus ploto korozijos pažeidimai gali neatspindėti pakankamai signalo energijos, taigi ir būti neaptinkami. Šiuo atveju pirminis korozijos sukeltas poveikis nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimui yra šių bangų slopinimo išaugimas. Todėl slopinimo,

jo pokyčio matavimas leidžia nustatyti korozijos lygį tiriamajame objekte. Tačiau tiriant talpyklų dugną šių bangų slopinimas yra nulemtas ne tik korozijos defektų, bet ir nuostolių, patiriamų nukreiptosioms ultragarso bangoms sklindant per didelį kiekį talpyklos dugne esančių suvirinimo siūlių. Skirtingai nei tiriant vamzdynes, pagrindinis talpyklų dugno neardomųjų bandymų tikslas – erdvinis korozijos sukeltų defektų pasiskirstymo ir jų parametrų nustatymas. Efektyviausias metodas šiam tikslui pasiekti yra nukreiptųjų ultragarso bangų panaudojimas, kartu taikant tomografinius rekonstrukcinius algoritmus. Įprastai tomografinė rekonstrukcija yra atliekama taikant filtruotos atgalinės projekcijos arba algebrinius rekonstrukcinius metodus. Daugeliu pateikiamų nukreiptųjų ultragarso bangų tomografijos taikymo atvejų yra gaunamas tik defektų tiriamajame objekte erdvinis pasiskirstymas, tačiau nėra žinomos ar pateikiamos absoliutinės jų vertės, kurios galėtų būti susietos su bendru korozijos lygiu ar objekto storio sumažėjimu.

2. NUKREIPTŪJŲ ULTRAGARSO BANGŲ SKLIDIMO TALPYKLOS DUGNU TYRIMAS

Siekiant tinkamai interpretuoti nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo dėsningumus, bet kokioje struktūroje svarbu suprasti jų sklidimo mechanizmą. Dėl to, siekiant atsakyti į pagrindinius klausimus, susijusius su nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimu, plačiai yra taikomas skaitmeninis modeliavimas. Atlikto skaitmeninio modeliavimo tikslas yra ištirti nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimą talpyklos dugnu, esant tėjiniam suvirinimui tarp talpyklos sienelės ir dugno (angl. *shell-to-bottom joint*) bei užleistiniam (angl. *lap joint*) suvirinimo sujungimui tarp talpyklos dugną sudarančių metalo plokščių. Visi šie sujungimai daro įtaką nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimui ir nėra pakankamai ištirti. Pagrindinis parametras, lemiantis talpyklos diametrą, kuris gali būti patikrintas tyrimams naudojant nukreiptąsias ultragarso bangas, yra šių bangų sklidimo nuostoliai, nulemti talpyklos dugną sudarančių sujungimų, kurie priklauso nuo tokių parametrų, kaip matavimo sistemos dažnis, užleistinio sujungimo plotis, adhezija tarp metalo plokščių ir kt.

Nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo per tėjinį sienelės ir dugno sujungimą tyrimas

Įprastai didelio nuotolio nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo ir tyrimo atveju tiriamieji bandiniai yra didelių matmenų ir nepraktiški laboratorinių tyrimų požiūriu. Dėl šios priežasties tyrimams atlikti buvo nuspręsta naudoti sumažinto dydžio fizinius ir skaitmeninius modelius, atitinkamai pakeičiant neardomųjų bandymų sistemos parametrus dėl tiesinės nukreiptųjų ultragarso bangų priklausomybės nuo dažnio ir storio fd sandaugos. Kartu užtikrinamas tiesioginis skaitmeninio modeliavimo metu bei eksperimentiniais tyrimais gautų rezultatų palyginimas.

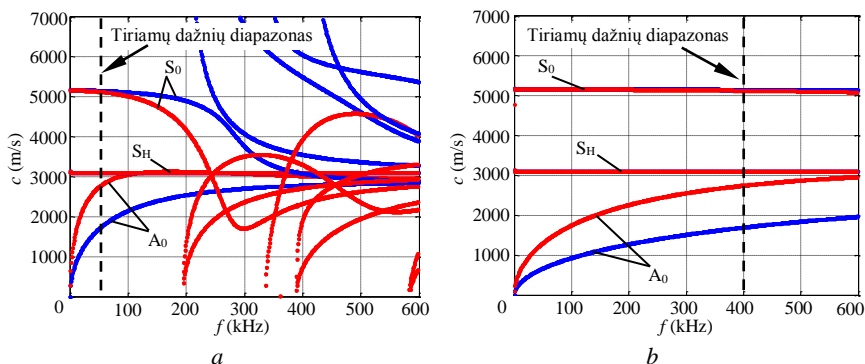
Siekiant ištirti nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimą talpyklos dugnu ir jo konstrukcinių elementų įtaką šių bangų sklidimo nuostoliams, buvo sukurti ir

ištirti skaitmeniniai modeliai su proporcingumo koeficientu 1:8. Tyrimai buvo atlikti naudojant nerūdijančio plieno plokštes (jo elastingės savybės yra pateikiamos 2.1 lent.). Dispersinės fazinio c_{ph} ir grupinio c_{gr} greičių kreivės 8 mm storio ir atitinkamai sumažintoje 1 mm storio nerūdijančio plieno plokštėse yra pateikiamos 2.1 pav. Nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo tyrimas buvo pagrįstas simetrinės S_0 bangos modos sklidimo analize dėl kelių priežasčių:

- simetrinės S_0 bangos modos greitis yra didesnis nei kitų fundamentinių nukreiptųjų ultragarso bangų modų, ir kartu užtikrinama, kad ši moda atsklis greičiau nei kitos bangų modos;
- simetrinė S_0 bangos moda pasižymi mažesniais energijos ištekėjimo į supančią aplinką nuostoliais ir užtikrina ilgesnį sklidimo nuotolį akustiškai apkrautose aplinkose.

2.1 lentelė. Tyrimo metu naudotos nerūdijančio plieno elastingės savybės

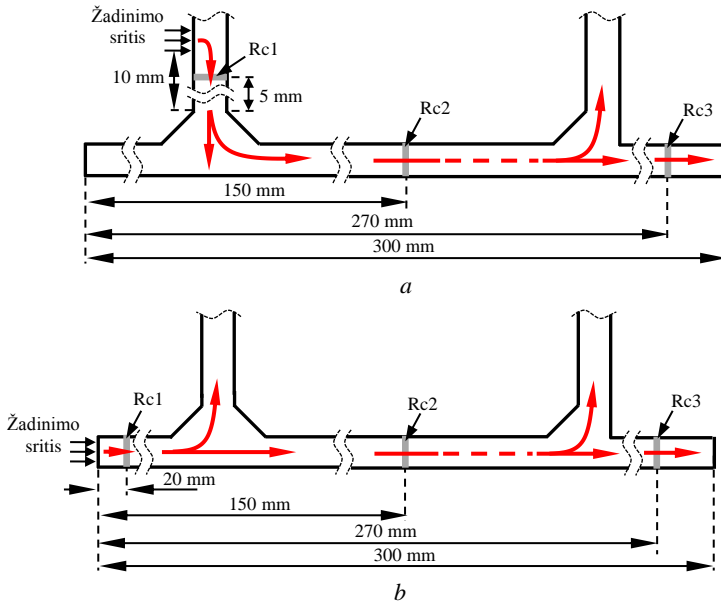
Medžiaga	Tankis ρ , kg/m ³	Jungo modulis E , GPa	Šlyties modulis G , GPa	Puasono koeficientas ν
Nerūdijančio plieno lydinys	8000	193	77,2	0,31



2.1 pav. Nukreiptųjų ultragarso bangų fazinio c_{ph} (mėlyna) ir grupinio c_{gr} (raudona) greičių dispersinės kreivės: 8 mm storio (a) ir 1 mm storio nerūdijančio plieno plokštėse (b)

Nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo modeliavimas buvo atliekamas taikant baigtinių elementų metodą ir ANSYS skaičiavimo paketą. Nukreiptųjų bangų sklidimo tyrimas buvo atliekamas taikant 2D modelį ir plokščiųjų įtempių būvio sąlygą. Skaitmeninis modeliavimas buvo atliekamas naudojant PLANE42 tipo elementus, esant $dx = dy = 0,2$ mm erdviniam diskretizavimo žingsniui. Diskretizavimo žingsnis laiko srityje $dt = 10$ ns. Modeliavimo laiko intervalas $\Delta t = 0 \div 130$ μ s. Nukreiptosios ultragarso bangos žadinamos 400 kHz dažnio, 5 periodų trukmės gausinės formos signalu.

Siekiant nustatyti galimus simetrinės S_0 bangos modos praėjimo nuostolius $\alpha_{S_0}(f)$ esant tėjiniam sujungimui tarp talpyklos sienelės ir dugno plokščių, buvo išskirti du nukreiptųjų ultragarso bangų žadinimo atvejai. Pirmuoju atveju (2.2 pav., *a*) nukreiptųjų ultragarso bangų žadinimas buvo atliekamas ant modelio sienelės (žadinimo srities plotis – 1 mm), antru atveju (2.2 pav., *b*) šių bangų žadinimas buvo atliekamas viename iš plokštės kraštų per visą plokštelės storį. Plokštės buvo nerūdijančio plieno, 1 mm storio. Žadinimas buvo atliekamas esant normalinei poveikio kryptiai.

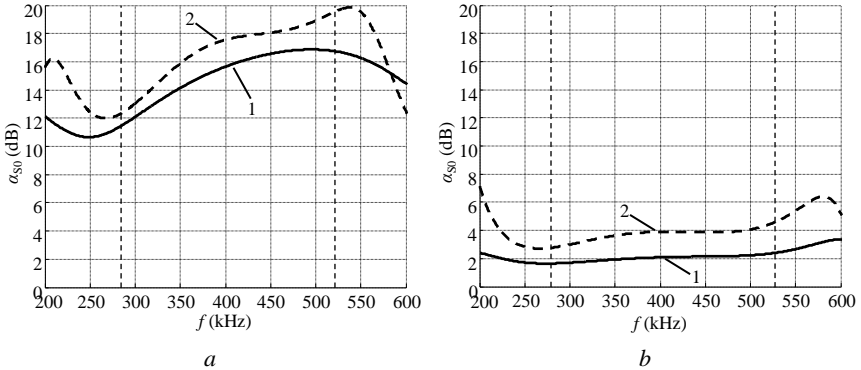


2.2 pav. Modeliai taikyti tiriant nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimą esant tėjiniam sienelės ir dugno sujungimui, kai: S_0 modos žadinimas atliekamas ant modelio sienelės (*a*), S_0 modos žadinimas atliekamas viename iš plokštelės kraštų (*b*)

Nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo nuostoliai $\alpha_{S_0}(f)$, sukelti tėjinio sienelės ir dugno sujungimo, įvertinti išskiriant modelyje sritis su virtualiais imtuvais (Rc1, Rc2, Rc3), atitinkamai prieš tėjinį sujungimą, po pirmo ir antro tėjinio sujungimo. Virtualių imtuvų padėtys buvo pasirinktos taip, kad simetrinė S_0 bangos moda kaip galima labiau atsiskirtų laike nuo kitų nagrinėjamame modelyje sklindančių nukreiptųjų ultragarso bangų modų. Nagrinėjama simetrinė S_0 bangos moda iš užregistruotų laikinių signalų buvo išskirta panaudojant laikinį Haningo langą. Sklidimo nuostolių $\alpha_{S_0}(f)$ įvertinimas tyrimo metu buvo atliktas taikant spektrų santykio palyginimą, remiantis žemiau pateikiama išraiška:

$$\alpha_{S_0}(f) = -20 \lg \left| \frac{\text{FT}[u_k(t)]}{\text{FT}[u_r(t)]} \right|; \quad (2.1)$$

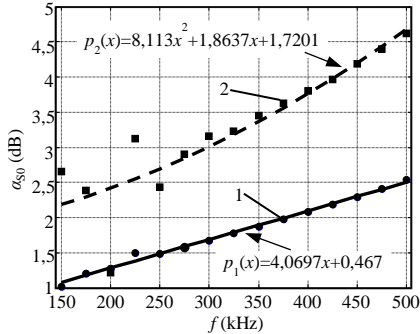
čia, $u_r(t)$ – atraminis signalas (vertė gauta virtualaus imtuvo Rc1 padėtyje), $u_k(t)$ – signalų vertės S_0 modai praėjus tėjiniį sujungimą (vertės gautos virtualių imtuvų Rc2 ir Rc3 padėtyse). Gauti S_0 modos praėjimo nuostolių $\alpha_{S_0}(f)$ rezultatai abiem tirtais nukreiptųjų bangų žadinimo atvejais yra pateikiami 2.3 pav.



2.3 pav. S_0 bangos modos praėjimo nuostoliai esant tėjiniam sienelės ir dugno sujungimui, kai žadinimas atliekamas: ant vertikalios modelio sienelės (*a*), ant plokštės krašto po 1 – pirmo tėjinio sujungimo; 2 – po antro tėjinio sujungimo (*b*)

Gauti rezultatai parodė, kad, kai yra tėjinis sujungimas tarp talpyklos sienelės ir dugno konstrukcijos, atliekant žadinimą ant sudaryto modelio sienelės (žr. 2.2 pav., *a*), yra gaunamas 15,9 dB S_0 bangos modos amplitudės sumažėjimas, kai bangos sklidimo kryptis yra iš sienelės į dugną. Tuo tarpu, atliekant žadinimą ant plokštės krašto (žr. 2.2 pav., *b*), buvo gautas 2,1 dB S_0 bangos modos amplitudės sumažėjimas. Tai leidžia daryti prielaidą, kad daug didesnės amplitudės nukreiptųjų ultragarso bangų simetrinės S_0 modos signalai yra tikėtini atliekant žadinimą ant talpyklos dugną sudarančių plokščių krašto.

Darbo metu atliktas skaitmeninis modeliavimas, siekiant iširti, kaip analizuojamos nukreiptųjų ultragarso bangų S_0 modos praėjimo nuostoliai priklauso nuo matavimo sistemos dažnio. Modeliuojama buvo esant bangų žadinimui ant plokštės krašto (žr. 2.2 pav., *b*) ir gausinės formos žadinimo signalo dažniui kintant diapazone nuo $f = 150 \div 500$ kHz, esant 25 kHz dažnio pokyčiui. Modeliavimo metu gauti S_0 bangos modos praėjimo nuostoliai $\alpha_{S_0}(f)$, esant skirtingam virtualaus siųstuvo žadinimo dažniui, yra pateikiami 2.4 pav.



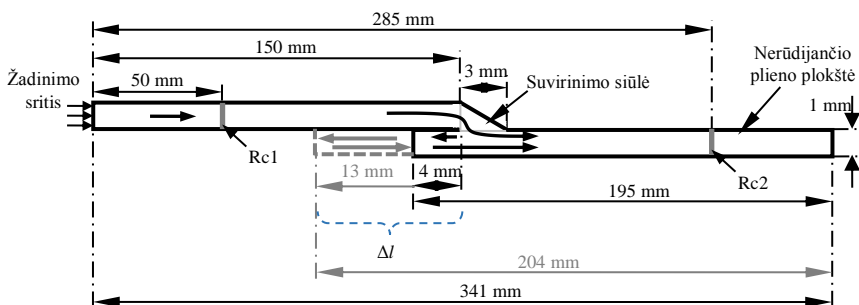
2.4 pav. S_0 bangos modos praėjimo nuostoliai esant tėjiniam sienelės ir dugno sujungimui tarp plokščių, kintant žadinimo impulso signalo dažniui: 1 – po pirmojo tėjinio sujungimo; 2 – po antrojo tėjinio sujungimo

Atlikto skaitmeniniu modeliavimu nustatyta, kad egzistuoja tiesinė priklausomybė tarp simetrinės S_0 modos praėjimo nuostolių $\alpha_{S_0}(f)$ ir žadinimo signalo dažnio. Modeliavimo metu nustatyta, kad, pakitus žadinimo signalo dažniui 25 kHz, vidutiniškai S_0 modos praėjimo nuostoliai išauga $0,108 \pm 0,052$ dB po pirmojo tėjinio sujungimo ir $0,085 \pm 0,055$ dB po antrojo tėjinio sujungimo (vertinant matavimo rezultatus dažnių diapazone nuo 275 kHz iki 500 kHz antrojo sujungimo atveju) esant sienelės ir dugno sujungimui.

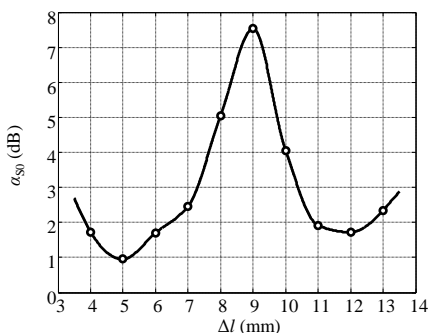
Nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimas užleistiniu suvirintuoju sujungimu

Paprastai naftos ir cheminių produktų talpyklų dugnas yra sudarytas iš tarpusavyje suvirintų anglinio plieno lakštų, juos tarpusavyje sujungiant užleistinio suvirinimo būdu. Atlikto skaitmeninio modeliavimo tikslas – nustatyti, kaip nukreiptųjų ultragarso bangų simetrinės S_0 modos praėjimo nuostoliai $\alpha_{S_0}(f)$ priklauso nuo šio užleistinio sujungimo persidengimo pločio Δl ir kaip šiuos praėjimo nuostolius veikia žadinimo signalo dažnio svyravimas. Tyrimui atlikti buvo sudarytas skaitmeninis baigtinių elementų modelis, kurio grafinė interpretacija yra pateikiama 2.5 pav. Modeliavimas buvo atliekamas naudojant tuos pačius modelio parametrus, kaip ir atliekant anksčiau pateiktus tyrimus. Modeliavimo laiko intervalas buvo parinktas $\Delta t = 0 \div 80$ μ s. Nukreiptųjų ultragarso bangų žadinimas buvo atliekamas iš plokštės galo, esant normalinei poveikio krypčiai. Nukreiptosios ultragarso bangos žadinamos 400 kHz dažnio, 5 periodų trukmės gausinės formos signalu. Užleistinio suvirintojo sujungimo persidengimo plotis Δl buvo tolygiai keičiamas nuo 4 mm iki 13 mm. Nukreiptųjų ultragarso bangų simetrinės S_0 modos praėjimo nuostolių nustatymas konkrečiai užleistinio suvirintojo sujungimo persidengimo pločio vertei buvo atliekamas taikant prieš sujungimą išmatuotas (virtualaus imtuvo Rc1 padėtyje) ir užleistinį suvirintąjį sujungimą praėjusios (virtualaus imtuvo Rc2 padėtyje) S_0 modos

signalų spektro santykio palyginimą. Tyrimų metu gauta nukreiptųjų ultragarso bangų S_0 modos praėjimo nuostolių priklausomybės kreivė nuo užleistinio sujungimo persidengimo pločio Δl yra pateikiama 2.6 pav.



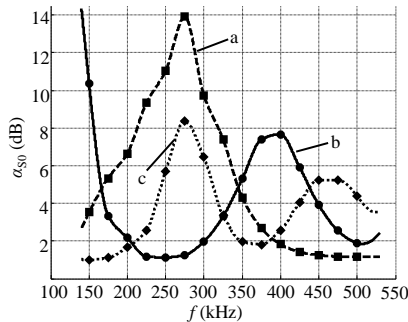
2.5 pav. Nukreiptųjų ultragarso bangų S_0 modos sklidimo tyrimo modelis esant užleistiniam sujungimui tarp talpyklos dugną sudarančių plokščių



2.6 pav. Simetrinės S_0 bangos modos praėjimo nuostoliai $\alpha_{S_0}(f)$ esant skirtingam užleistinio sujungimo persidengimo pločiui Δl

Atlikus skaitmeninį modeliavimą nustatyta, kad dėl skirtingo užleistinio sujungimo tarp plokščių persidengimo pločio Δl per suvirinimą praėjusios simetrinės S_0 bangos modos praėjimo nuostoliai $\alpha_{S_0}(f)$ kinta nuo 0,95 dB iki 7,53 dB. Gautais rezultatais nustatyta, kad didžiausi bangos sklidimo nuostoliai yra patiriami esant 9 mm užleistinio suvirinimo persidengimo pločiui. Gauta praėjimo nuostalių $\alpha_{S_0}(f)$ priklausomybė nuo užleistinio sujungimo pločio yra nulemta bangų interferencijos, vykstančios taikant užleistinį plokščių sujungimą, t. y. tiesioginės praėjusios ir nuo sujungimo krašto atspindėtos bangos interferencijos. Šiuo atveju, priklausomai nuo užleistinio sujungimo tarp plokščių persidengimo pločio Δl ir bangos ilgio, šios tiesioginė praėjusi ir nuo užleistinio sujungimo krašto atspindėtos bangos yra fazėje viena su kita ar priešfazėje ir atitinkamai nulemia didesnės arba mažesnės amplitudės atstojamąją banga.

Siekiant nustatyti, kaip nukreiptųjų ultragarso bangų simetrinės S_0 modos praėjimo nuostoliai priklauso nuo žadinimo signalo dažnio svyravimo, buvo atliktas skaitmeninis modeliavimas, poveikio signalo dažniui kintant nuo $f = 150 \div 500$ kHz, esant 25 kHz dažnio pokyčiui. Praėjimo nuostolių nustatymas kiekvienu atveju buvo atliekamas spektrų santykio palyginimo metodu. Gauta praėjimo nuostolių priklausomybė nuo žadinimo signalo dažnio, esant 4 mm, 9 mm ir 13 mm užleistinio sujungimo persidengimo pločių vertėms, yra pateikiama 2.7 pav.



2.7 pav. Nukreiptųjų ultragarso bangų S_0 modos praėjimo nuostoliai $\alpha_{S_0}(f)$ esant skirtingam žadinimo signalo dažniui ir užleistinio sujungimo persidengimo pločio vertėms: a – 4 mm, b – 9 mm, c – 13 mm užleidimo plotis

Remiantis atliktu skaitiniu modeliavimu nustatyta, kad egzistuoja reguliarus praėjimo nuostolių $\alpha_{S_0}(f)$ maksimumo ir minimumo kitimas, priklausomas nuo žadinimo signalo dažnio ir užleistinio sujungimo persidengimo pločio Δl . Tyrimo metu nustatyta, kad užleistinis sujungimas veikia kaip atspindėtuvas, ir praėjimo nuostolių išaugimas yra tikėtinas esant nelyginiam $\lambda/4$, tenkančiam į užleistinio sujungimo persidengimo plotį. Tuo tarpu, praėjimo nuostolių sumažėjimas yra tikėtinas esant lyginiam $\lambda/4$, tenkančiam į užleistinio sujungimo persidengimo plotį. Ši praėjimo nuostolių maksimumo ir minimumo priklausomybė gali būti nusakoma žemiau pateikiama išraiška:

$$\alpha_{S_0}(f, \Delta l) = \max\left(\frac{n \cdot c_{gr}}{4f}\right), n = 1, 3, 5, \dots$$

$$\alpha_{S_0}(f, \Delta l) = \min\left(\frac{n \cdot c_{gr}}{4f}\right), n = 2, 4, 6, \dots$$
(2.2)

Užleistinio suvirintojo sujungimo sukibimo įtaka nukreiptųjų bangų sklidimui

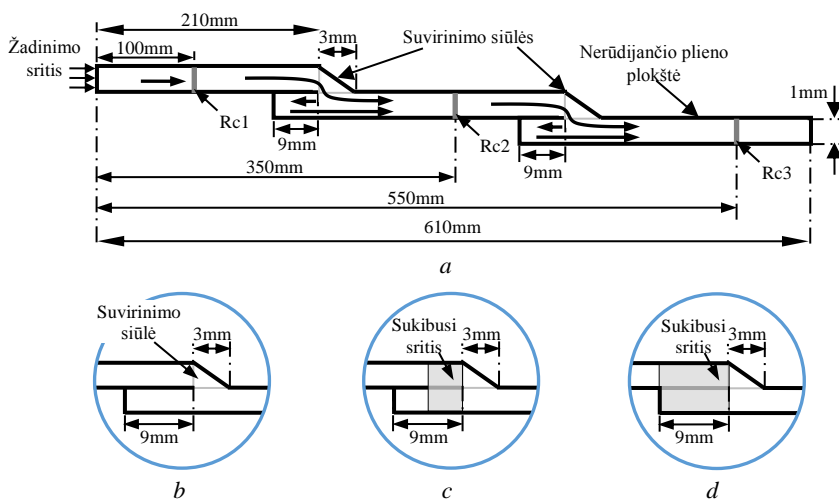
Kadangi talpyklų dugnas yra sudarytas iš tarpusavyje suvirintų plieno lakštų taikant užleistinio sujungimo būdą, yra daroma prielaida, kad tarp atskirų lakštų

yra „praslystantis“ kontaktas ir visas nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimas iš vienos plokštės į kitą vyksta tik suvirinimo siūlės srityje. Tačiau dėl ilgo talpyklų eksploataavimo laiko (paprastai talpyklų eksploataavimo periodas 25 metai, tačiau praktikoje jos gali būti naudojamos iki 50–70 metų), sąveikos su dirvožemiu, slėgio, drėgmės patekimo į užleistinį suvirinimą išauga korozijos atsiradimo rizika pačiame užleistiniame sujungime. Ilguoju periodu tai nulemia kontakto savybių tarp atskirų užleistinių suvirinimų sujungtų plokščių pakitimą ir galimą „kieto“ tipo kontaktą. Kartu tai lemia bendrą užleistinio sujungimo pločio pokytį ir nukreiptųjų ultragarso bangų perdavimo efektyvumo kitimą.

Pagrindinis atlikto skaitmeninio modeliavimo tikslas – ištirti, kokią įtaką galimas sukibimas tarp užleistinių suvirinimų sujungtų plieno plokščių turi nagrinėjamos nukreiptųjų ultragarso bangų simetrinės S_0 bangos modos praėjimo nuostoliams $\alpha_{S_0}(f)$. Tyrimui atlikti buvo sudarytas baigtinių elementų modelis, kurio grafinė interpretacija yra pateikiama 2.8 pav., a. Tyrimai buvo atlikti esant trims užleistinio sujungimo atvejams:

- plokštės tarpusavyje kontaktuoja tik suvirinimo siūlės vietoje (2.8 pav., b);
- plokštės tarpusavyje sukibusios per pusę užleistinio sujungimo pločio (50 proc. sukibimas) (2.8 pav., c);
- plokštės sukibusios per visą užleistinio sujungimo plotį (100 proc. sukibimas) (2.8 pav., c)

Modeliavimas buvo atliekamas naudojant tuos pačius modelio parametrus, kaip anksčiau pateiktų tyrimų atveju.



2.8 pav. Nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo tyrimo modelis esant užleistiniam plokščių suvirinimui, kai (a): plokštės tarpusavyje jungiasi tik suvirinimo siūlės padėtyje (b); dalinai sukibusios plokštės (c); per visą užleistinio sujungimo plotį sukibusios plokštės (d)

Praėjimo nuostolių įvertinimas buvo atliekamas taikant prieš užleistinį sujungimą išmatuotos ir juos praėjusios S_0 modos spektrų santykio palyginimo metodą. Gauti simetrinės S_0 nukreiptųjų ultragarso bangos praėjimo nuostoliai kiekvienu tirtu atveju, esant centriniam 400 kHz žadinimo signalo dažniui, yra pateikiami 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Simetrinės S_0 bangos modos praėjimo nuostoliai esant skirtingai užleistinio sujungimo būklei

	Tiriamas atvejis	$\alpha_{S_0_1}$, dB	$\alpha_{S_0_2}$, dB
1.	Plokštės sujungtos tik suvirinimo siūle	7,7	16,1
2.	Dalinai sukibusios plokštės (50 proc. sukibimas)	2,1	4,1
3.	Visiškai sukibusios plokštės (100 proc. sukibimas)	2,7	5,4

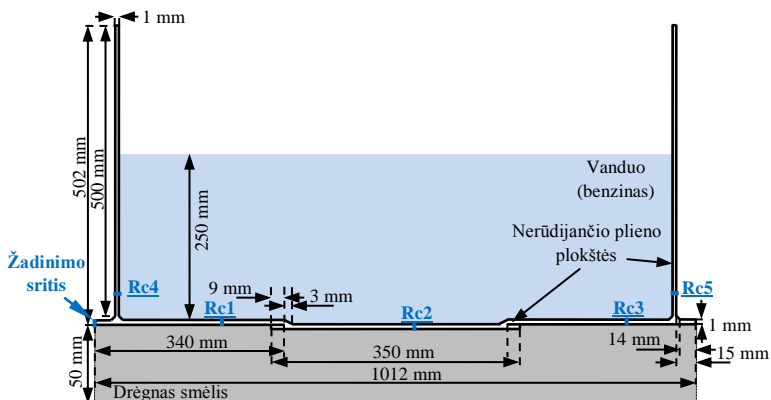
Atlikus skaitmeninį modeliavimą nustatyta, kad didžiausi simetrinės S_0 bangos modos praėjimo nuostoliai, esant užleistiniam sujungimui, yra gaunami, kai plokštės tarpusavyje jungiasi tik suvirinimo siūlės srityje. Remiantis gautais rezultatais nustatyta, kad vidutinė praėjimo nuostolių $\alpha_{S_0}(f)$ vertė, esant užleistiniam sujungimui, kai plokštės tarpusavyje jungiasi tik suvirinimo siūlės zonoje, yra 8,05 dB/suvirinimui. Tuo tarpu kai plokštės dalinai sukibusios (kai sukibimas lygus 50 proc. užleistinio sujungimo pločio) ir visiškai sukibusios, buvo gauta, kad šie praėjimo nuostoliai yra atitinkamai lygūs 2,05 dB/suvirinimui ir 2,7 dB/suvirinimui. Gautas ryškus praėjimo nuostolių $\alpha_{S_0}(f)$ sumažėjimas gali būti paaiškinamas tuo, kad dėl plokščių sukibimo pakinta užleistinio sujungimo kontakto zonos plotis. Todėl dėl išaugusio kontakto zonos pločio didesnė simetrinės S_0 modos energijos dalis yra perduodama iš vienos plokštės į kitą esant užleistiniam sujungimui ir nulemia daug mažesnius suminius perdavimo nuostolius.

Apkrovimo įtaka nukreiptųjų bangų sklidimui talpyklos dugnu

Nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimas talpyklos dugnu yra komplikuoatas ne tik dėl daugybės jį sudarančių plokščių sujungimų skaičiaus, bet ir dėl bangos energijos išteklėjimo į supančią aplinką. Tai tiesiogiai veikia sklindančių nukreiptųjų ultragarso bangų amplitudę ir turi esminę įtaką kai kurių bangų modų tolimesniam sklidimui. Siekiant iširti, kokią įtaką nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimui talpyklos dugnu turi papildomas jo apkrovimas kita medžiaga, buvo atliktas 2D modeliavimas esant skirtingoms talpyklos dugno apkrovimo sąlygoms. Tyrimai buvo atlikti naudojant skaitmeninį modelį, kurio grafinė interpretacija yra pateikiama 2.9 pav. Nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimas ir praėjimo nuostoliai vertinti tokiais atvejais:

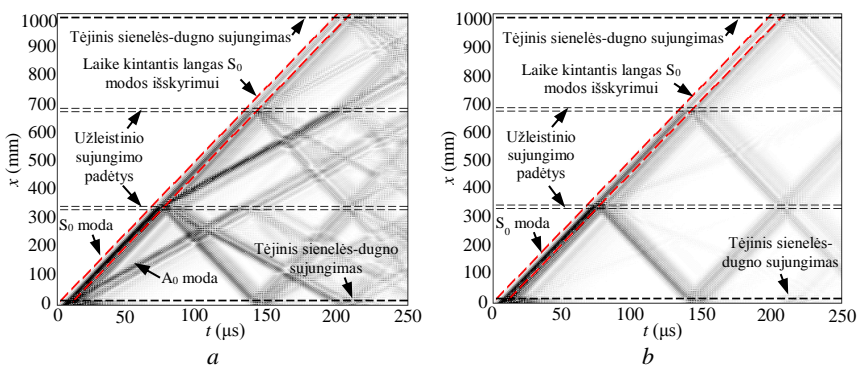
- be talpyklos dugno apkrovimo (supanti aplinka vakuumas);
- esant vandens apkrovai ant talpyklos viršutinio paviršiaus;
- esant benzino apkrovai ant talpyklos viršutinio paviršiaus;

- d) esant vandens apkrovai ant talpyklos viršutinio paviršiaus ir drėgno smėlio apkrovai ant talpyklos apatinio paviršiaus.



2.9 pav. 2D talpyklos modelis, taikytas apkrovos įtakai nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimui tirti

Skaitmeninio modeliavimo metu gauti charakteringi B tipo vaizdai (be papildomo talpyklos dugno apkrovimo ir apkrovus talpyklos dugną papildoma medžiaga), parodantys talpyklos dugnu sklindančias nukreiptąsias ultragarso bangas, yra pateikiami 2.10 pav.

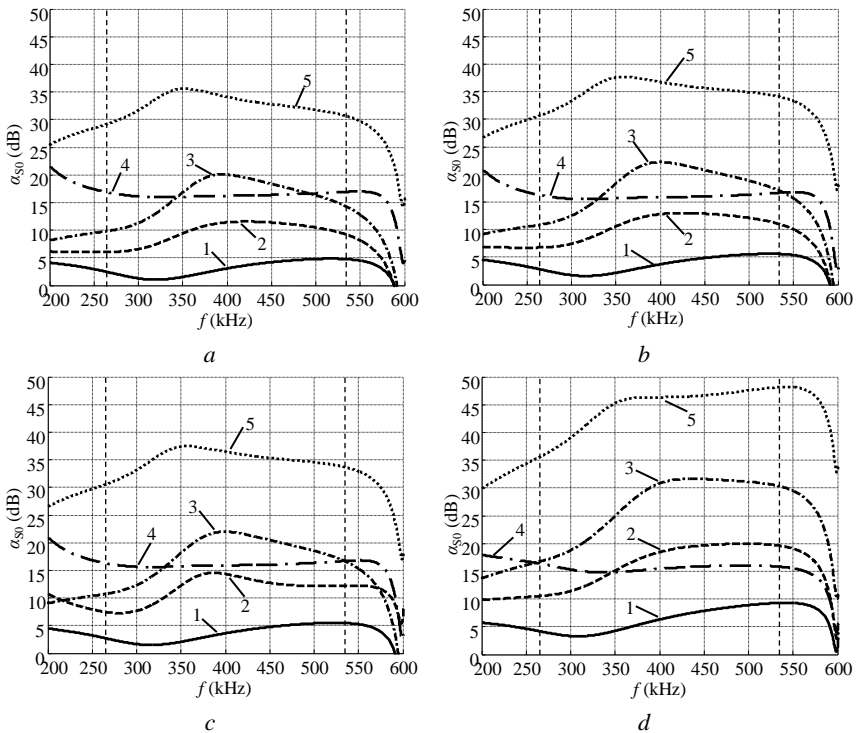


2.10 pav. Talpyklos dugnu sklindančių nukreiptųjų ultragarso bangų B tipo vaizdai, kai: nėra papildomos akustinės apkrovos (*a*); yra vandens apkrova (*b*)

Bendru atveju, kai nėra papildomo talpyklos dugno apkrovimo (žr. 2.10 pav., *a*), yra aiškiai matomos tiriamoje struktūroje sklindančios tiek simetrinė S_0 , tiek ties tiriamos struktūros tėjinio ir užleistinio sujungimais dėl modų virsmų susigeneravusi asimetrinė A_0 nukreiptųjų ultragarso bangų modos. Tuo tarpu papildomas talpyklos dugno apkrovimas (žr. 2.10 pav., *b*) kita medžiaga (pvz., vandeniu, benzinu ir kt.) nulemia staigų asimetrinės A_0 modos amplitudės

sumažėjimą dėl didelių šios modos ištekėjimo nuostolių į supančią aplinką nagrinėjamą dažnių diapazone. Šiuo atžvilgiu S_0 modos amplitudės sumažėjimas didžiąja dalimi yra gaunamas dėl bangos praėjimo nuostolių ant talpyklos dugną sudarančių sujungimų ir bangos energijos ištekėjimo į supančią aplinką, kurie kinta priklausomai nuo esamos talpyklos dugno apkrovimo sąlygų.

Tikėtinų praėjimo nuostolių įvertinimas, esant skirtingoms talpyklos apkrovimo sąlygoms, buvo atliktas taikant S_0 bangos modos spektrų santykio palyginimo metodą, išskiriant sritis (Rc1 – Rc5) atitinkamai po kiekvieno talpyklos dugną sudarančių tėjinio ir užleistinio plokščių sujungimo. Gauti spektrų santykiai, iliustruojantys praėjimo nuostolių kitimą esant skirtingoms akustinės apkrovos sąlygoms, yra pateikiami 2.11 pav. Gauti praėjimo nuostoliai, esant centriniam 400 kHz žadinimo signalo dažniui, yra pateikiami 2.3 lentelėje.



2.11 pav. Nukreiptųjų ultragarso bangų S_0 modos praėjimo nuostoliai: *a* – be papildomo talpyklos dugno apkrovimo, *b* – esant vandens apkrovai ant talpyklos viršutinio paviršiaus, *c* – esant benzino apkrovai ant talpyklos viršutinio paviršiaus, *d* – esant vandens apkrovai ant viršutinio ir drėgno smėlio apkrovoms ant apatinio talpyklos paviršiaus (1 – po pirmojo užleistinio sujungimo, 2 – po antrojo užleistinio sujungimo, 3 – po trečiojo užleistinio sujungimo, 4 – po pirmojo tėjinio sujungimo, 5 – po antrojo tėjinio sujungimo)

2.3 lentelė. Simetrinės S_0 modos praėjimo nuostoliai, esant skirtingoms talpyklos akustinės apkrovos sąlygoms

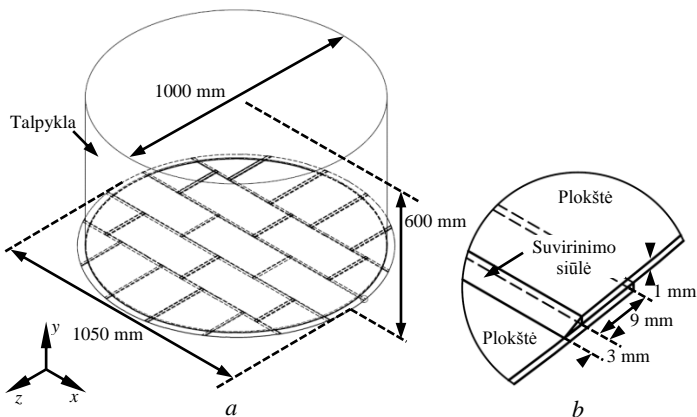
Virtualaus imtuvo padėtis	Nėra apkrovos	Vandens apkrova	Benzino apkrova	Vandens ir drėgno smėlio apkrova
Prieš užleistinį sujungimą	3,1 dB	3,7 dB	3,6 dB	6,3 dB
Po pirmo užleistinio sujungimo	11,4 dB	12,8 dB	14,4 dB	18,4 dB
Po antro užleistinio sujungimo	20,1 dB	22,2 dB	22,2 dB	30,8 dB
Pirma vertikali sienelė	16,2 dB	15,8 dB	15,9 dB	15,4 dB
Antra vertikali sienelė	34,1 dB	36,7 dB	36,5 dB	46,3 dB

Darbe atliktu skaitmeniniu modeliavimu buvo nustatyta, kad papildomas talpyklos dugno apkrovimas nulemia simetrinės S_0 bangų modos ištekėjimą į supančią aplinką. Atlikus tyrimą gauta, kad šios nukreiptųjų ultragarso bangų S_0 modos ištekėjimo nuostoliai, esant papildomai vandens apkrovai sudarytame modelyje, siekia 2,2 dB/m, esant benzino apkrovai, – 1,9 dB/m, o, esant vandens bei drėgno smėlio apkrovoms, – 12,3 dB/m.

Nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo 3D modeliavimas

Nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimas sumažinto dydžio talpyklos makete yra daug sudėtingesnis, nei buvo pateikta ir analizuota esant 2D bangų sklidimo atveju, dėl objekto vykstančio bangų išsklaidymo, didelio dugno suvirinimo siūlių skaičiaus, bangos energijos sklaidos ir daugkartinių atspindžių tiriamoje struktūroje. Pagrindinis 3D skaitmeninio modeliavimo privalumas yra tai, kad jis leidžia įvertinti daugelį šių bangos sklidimo aspektų, tačiau reikalauja didesnių laiko ir kompiuterinių resursų sąnaudų. Pateikiamo 3D modeliavimo tikslas – ištirti nukreiptųjų ultragarso bangų simetrinės S_0 modos sklidimą sumažinto dydžio talpyklos makete. Šiam tikslui pasiekti buvo sudarytas sumažinto dydžio talpyklos 3D modelis, kuris yra pateikiamas 2.12 pav.

Nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo modeliavimas buvo atliekamas taikant baigtinių elementų metodą ir *Abaqus/Explicit* skaičiavimo paketą. Talpyklos dugno, sudaryto iš tarpusavyje sujungtų atskirų plieno plokščių panaudojant užleistinį suvirinimą, modeliavimas buvo atliekamas naudojant C3D8R tipo elementus. Talpyklos sienelės modeliavimas buvo atliekamas panaudojant C4R tipo elementus. Erdvinis diskretizavimo žingsnis buvo priimtas lygus 0,5 mm. Bendras modelį sudarančių baigtinių elementų skaičius – 15965683 (C3D8R – 7843057, C4R – 8122626). Modeliavimo laiko intervalas $\Delta t = 0 \div 250 \mu s$. Virtualiam siųstuvui žadinti naudojamas 400 kHz dažnio, 5 periodų trukmės gausinės formos signalas. Nukreiptųjų bangų žadinimas buvo atliekamas ant talpyklos sienelės. Virtualaus siųstuvo matmenys buvo 9×9 mm.

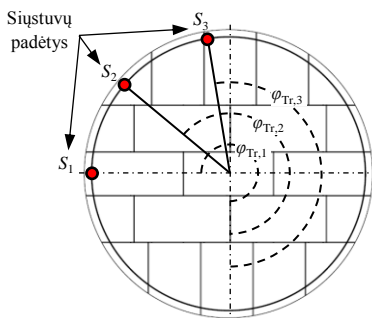


2.12 pav. Sumažinto dydžio talpyklos 3D modelis (a); modelyje taikytas užleistinis suvirinimas tarp talpyklos dugną sudarančių plokščių (b)

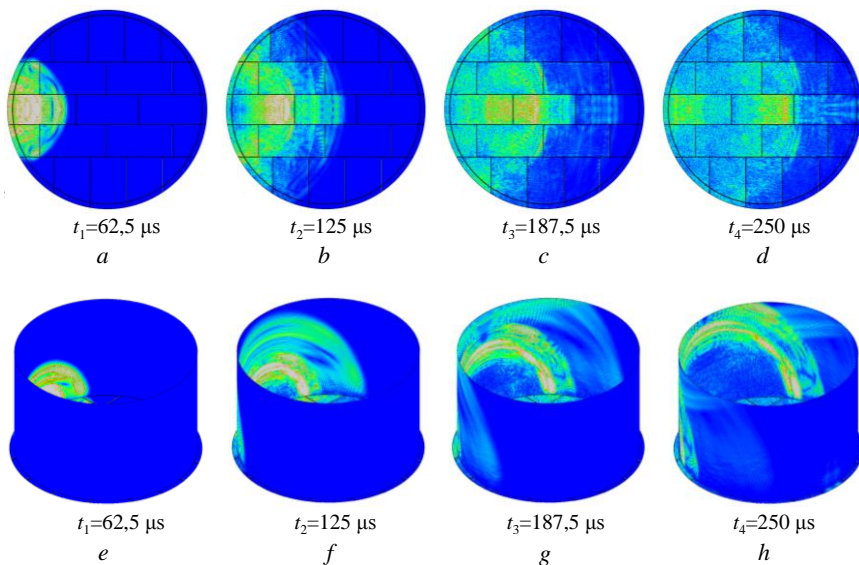
Erdvinis 3D nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo modeliavimas buvo atliktas esant trimis skirtingoms siūstuvų padėtimis ant talpyklos sienelės. Siūstuvų padėtis ant talpyklos sienelės buvo nustatyta remiantis žemiau pateikiama išraiška:

$$\begin{aligned} x_{Tr,n} &= R_T \cos(\varphi_{Tr,n} - \pi/2), \\ y_{Tr,n} &= R_T \sin(\varphi_{Tr,n} - \pi/2), \end{aligned} \quad (2.3)$$

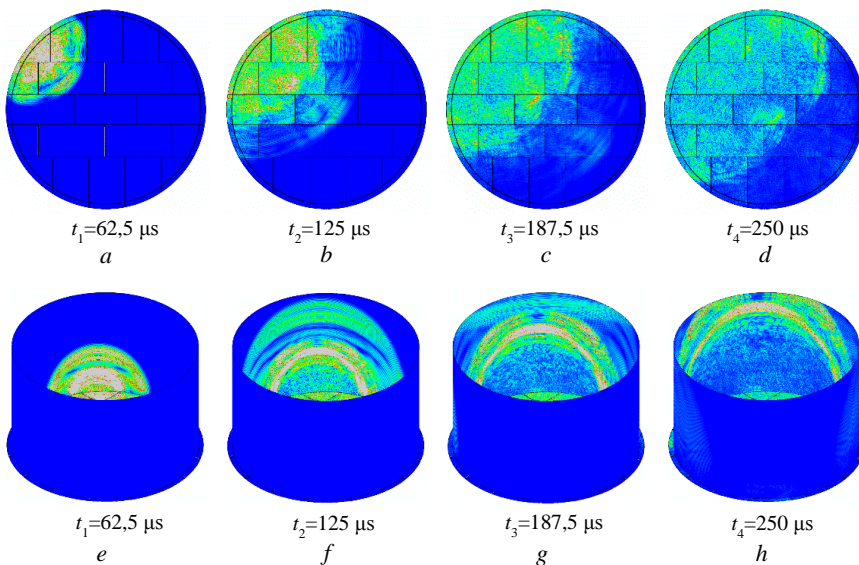
čia, $x_{Tr,n}$, $y_{Tr,n}$ – siūstuvų koordinatės, $n = 1 \div N_{Tr}$, kur N_{Tr} yra siūstuvų skaičius, R_T – talpyklos diametras, $\varphi_{Tr,n}$ – siūstuvo kampas. Erdvinis 3D talpyklos modeliavimas buvo atliktas esant siūstuvų padėtimis – $\varphi_{Tr,1} = 270^\circ$, $\varphi_{Tr,2} = 228,75^\circ$ ir $\varphi_{Tr,3} = 187,5^\circ$. Grafinis siūstuvų išdėstymo ant talpyklos sienelės pateikimas yra pateiktas 2.13 pav. Gauti erdvinio nukreiptųjų ultragarso bangų virpamojo greičio modulio pasiskirstymo rezultatai skirtingais laiko momentais ir esant skirtingoms siūstuvų padėtimis ant sudaryto talpyklos modelio sienelės yra pateikiami 2.14–2.16 pav.



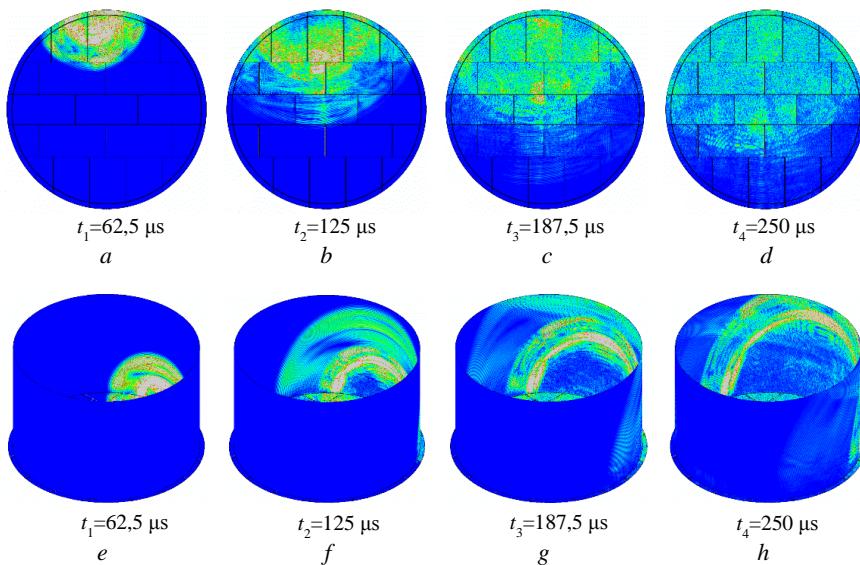
2.13 pav. Tirti nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo sudarytame talpyklos 3D modelyje atvejai esant skirtingoms siūstuvų padėtimis ant talpyklos sienelės



2.14 pav. Nukreiptųjų ultragarso bangų virpamojo greičio pasiskirstymas sumažintame talpyklos 3D modelyje skirtingais laiko momentais, kai $\varphi_{\text{Tr},1} = 270^\circ$



2.15 pav. Nukreiptųjų ultragarso bangų virpamojo greičio pasiskirstymas sumažintame talpyklos 3D modelyje skirtingais laiko momentais, kai $\varphi_{\text{Tr},2} = 228,75^\circ$

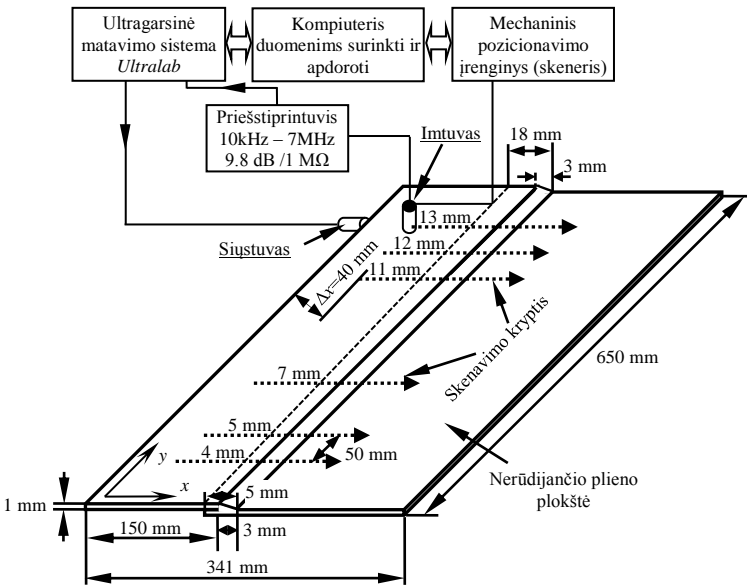


2.16 pav. Nukreiptųjų ultragarso bangų virpamojo greičio pasiskirstymas sumažintame talpyklos 3D modelyje skirtingais laiko momentais, kai $\varphi_{Tr,3} = 187,5^\circ$

Iš pateikiamo virpamojo greičio modulio pasiskirstymo sumažinto dydžio 3D talpyklos makete skirtingais laiko momentais, esant skirtingoms ultragarso bangas žadinančiojo siūstovo padėtimis ant talpyklos sienelės, nustatyta, kad nukreiptosios ultragarso bangos pateikiamame talpyklos modelyje sklinda radialine kryptimi. Tai yra paaiškinama tuo, kad pasirinkto virtualaus keitiklio matmenys yra daug mažesni nei talpyklos diametras, ir jis tampa artimas taškiniam bangų šaltiniui, turinčiam plačią kryptingumo diagramą. Taip pat, remiantis pateikiama bangų sklidimo vizualizacija xOz plokštumoje, iliustruojančia bangų sklidimą talpyklos dugnu, gali būti išvelgiami nukreiptųjų ultragarso bangų amplitudės pokyčiai, sukelti geometrinės objekto struktūros sudėtingumo. To pasėkoje bangų sklaida, difrakcija, modų virsmas ir energijos išsklaidymas nulemia sudėtingą nagrinėjamos nukreiptųjų ultragarso bangų simetrinės S_0 modos sklidimą talpyklos dugnu, sudarytu iš daugelio tarpusavyje sujungtų plokščių panaudojant užleistinį suvirintąjį sujungimą. Taip pat, remiantis gautais 3D skaitmeninio modeliavimo rezultatais, galima teigti, kad didžiausios amplitudės nukreiptųjų ultragarso bangų signalai gali būti išmatuojami talpyklos dugno srityse, turinčiose mažesnę suvirinimo siūlių skaičių tiesiogine bangų sklidimo kryptimi. Taip pat atliktu tyrimu nustatyta, kad kampas, kuriam esant yra galimas per talpyklos dugną praėjusių nukreiptųjų ultragarso bangų registravimas, dėl bangų, sklindančių tiesiogiai talpyklos sienoje, yra apribotas apytiksliai iki 180° .

3. EKSPERIMENTINIS NUKREIPTŲJŲ ULTRAGARSO BANGŲ SKLIDIMO LAKŠTINĖSE KONSTRUKCIJOSE TYRIMAS

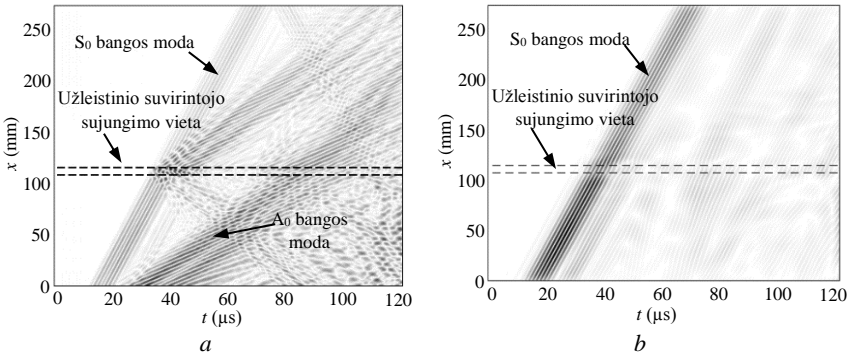
Remiantis ankstesniame skyriuje pateikiamais skaitmeninio modeliavimo rezultatais, taikant baigtinių elementų metodą, buvo nustatyta, kad pagrindiniai nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo talpyklos dugnu nuostoliai yra nulemti užleistinio suvirintojo sujungimo, naudojamo atskiros talpyklos dugną sudarančioms plokštėms sujungti. Siekiant patikrinti skaitmeninio modeliavimo metu gautus dėsningumus ir įvertinti nukreiptųjų ultragarso bangų S_0 modos praėjimo nuostolius, esant skirtingam persidengimo pločio Δl užleistiniam sujungimui tarp nerūdijančio plieno plokščių, buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai pagal 3.1 pav. pateikiamą eksperimentinių tyrimų schemą.



3.1 pav. Eksperimentinių tyrimų schema simetrinės S_0 bangos modos nuostoliams įvertinti esant skirtingo persidengimo pločio Δl užleistiniam sujungimui

Eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti naudojant žemo dažnio ultragarso matavimo sistemą *Ultralab*, sukurtą ir pagamintą KTU Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institute. Nukreiptųjų ultragarso bangų žadinimas ir registravimas tyrimų metu buvo atliekamas naudojant žemo dažnio storio modos ultragarsinius keitiklius. Nukreiptųjų ultragarso bangų žadinimas tiriamajame bandinyje buvo atliekamas naudojant 400 kHz, 3 periodų trukmės stačiakampio formos impulsą. Signalų registravimas buvo atliekamas naudojant keitiklį su nusidėvėjimui atspariu išgaubtos formos keičiamu protektoriumi, pagamintu iš stiklo pluošto, kurio kontakcinio paviršiaus diametras 1 mm. Geresniam

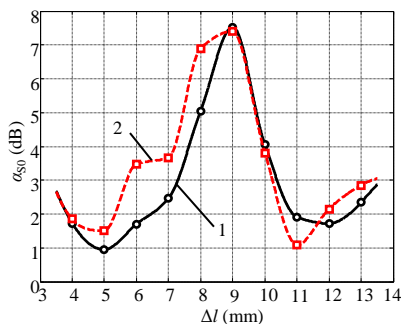
akustiniam kontaktui tarp tiriamojo objekto ir keitklių užtikrinti tyrimų metu buvo naudojamas glicerolio kontaktinis skystis. Matavimai buvo atliekami esant 50 mm atstumui tarp atskirų matavimo padėčių taip, kad užleistinio suvirintojo sujungimo persidengimo plotis Δl tolygiai kistų nuo 4 mm iki 13 mm, esant kitimo intervalui 1 mm. Tyrimų metu buvo atliktas objekto skenavimas 270 mm atkarpoje (pradinis atstumas tarp keitklių 40 mm), esant 0,1 mm skenavimo žingsniui, ir gauti objekte sklindančių nukreiptųjų ultragarso bangų B tipo vaizdai (3.2 pav., *a*). Tyrimų metu nustatyta, kad, taikant pateikiamą eksperimentinių tyrimų schemą (žr. 3.1 pav.), labiausiai dominuojanti ir stipriausia tiriamajame objekte sklindanti yra asimetrinė A_0 nukreiptųjų ultragarso bangų moda. Tai gali būti paaiškinama tuo, kad matavimams atlikti naudojamas storio modos ultragarsinis keitklis yra daug jautresnis tangentinei u_y poslinkių komponentei, kuri yra vyraujanti dedamoji sklindant A_0 modai. Taip pat objekte sklindanti simetrinė S_0 bangos moda, turinti daug mažesnę amplitudę, gali būti aiškiai matoma pateikiamame paveiksle (3.2 pav., *a*). Siekiant išskirti S_0 bangos modą iš kitų objekte sklindančių ir nuo tiriamojo bandinio kraštų atspindėtų nukreiptųjų ultragarso bangų modų, darbo metu buvo atliktas šios modos erdvinis filtravimas banginio skaičiaus-dažnio srityje. Atlikus erdvinį filtravimą gautas tiriamajame bandinyje sklindančių nukreiptųjų bangų B tipo vaizdas yra pateikiamas 3.2 pav., *b*.



3.2 pav. Eksperimentiškai gautas objekte sklindančių nukreiptųjų ultragarso bangų B tipo vaizdas esant 4 mm užleistinio sujungimo pločiui (*a*); rekonstruotas B tipo vaizdas po erdvinio filtravimo dažnių srityje, esant 4 mm užleistinio sujungimo pločiui (*b*)

Simetrinės S_0 bangų modos praėjimo nuostolių $\alpha_{S_0}(f)$ įvertinimas buvo atliktas taikant spektrų santykio palyginimo metodą, lyginant prieš užleistinį sujungimą (90 mm atstumu nuo siūstovo išmatuotos) ir po užleistinio sujungimo (265 mm atstumu nuo siūstovo išmatuotos) išmatuotus S_0 modos signalus, kurie buvo išskirti iš po erdvinio filtravimo gautų B tipo vaizdų. Eksperimentinių tyrimų metu gauta nukreiptųjų ultragarso bangų S_0 modos praėjimo nuostolių priklausomybė nuo užleistinio sujungimo persidengimo pločio Δl yra pateikiama 3.3 pav. Kartu yra pateikiama ir skaitmeninio modeliavimo metu, taikant baigtinių

elementų metodą, gautų S_0 modos praėjimo nuostolių $\alpha_{S_0}(f)$ priklausomybė nuo užleistinio sujungimo persidengimo pločio Δl .



3.3 pav. Eksperimentiniai simetrinės S_0 bangos modos praėjimo nuostoliai $\alpha_{S_0}(f)$, esant skirtingam užleistinio sujungimo persidengimo pločiui Δl : 1 – gauta baigtinių elementų metodu, 2 – išmatuota eksperimentinių tyrimų metu

Tyrimų metu nustatyta, kad eksperimentiškai išmatuotiems S_0 modos praėjimo nuostoliams būdingas panašus kitimo pobūdis, nulemtas užleistinio sujungimo pločio, kaip buvo gauta skaitmeninio modeliavimo metu. Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad nukreiptųjų ultragarso bangų simetrinės S_0 modos praėjimo nuostoliai kinta nuo 1 dB iki 8 dB, priklausomai nuo užleistinio sujungimo persidengimo pločio Δl . Tyrimų metu nustatyta, kad didžiausi praėjimo nuostoliai yra gaunami esant 9 mm užleistinio sujungimo persidengimo pločiui ir yra lygūs 7,6 dB. Šiuo atveju nesutapimai tarp eksperimentiškai išmatuotų praėjimo nuostolių ir gautų taikant baigtinių elementų analizės metodą daugiausia yra nulemti ultragarso bangas žadinančiojo siūstovo tvirtinimo prie bandinio krašto nestabilumo – lygiagretumo nustatymo, kuris tiesiogiai veikia akustinį kontaktą tarp keitiklio ir tiriamojo bandinio.

4. ULTRAGARSINĖS TOMOGRAFIJOS PARAMETRŲ ĮVERTINIMAS PANAUDOJANT SKAITMENINĮ MODELĮ

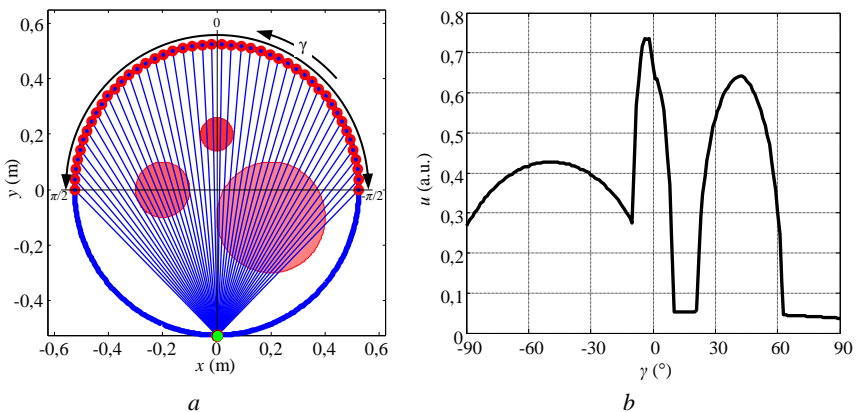
Šiame skyriuje aprašomas darbe pateikiamas tomografinis rekonstrukcinis metodas tikrosioms nukreiptųjų ultragarso bangų slopinimo vertėms atkurti. Kartu pateikiamas sudarytas talpyklos dugno modelis ir taikant pasiūlytą tomografinį rekonstrukcinį metodą gauti slopinimo pasiskirstymo talpyklos dugno modelyje rekonstrukcijos rezultatai.

Tomografinės rekonstrukcijos algoritmas

Bendru atveju tomografinė rekonstrukcija yra apibrėžiama kaip metodas, leidžiantis atkurti tam tikro matuojamojo parametro erdvinį pasiskirstymą, objekto pjūvyje naudojant įvairiomis kryptimis gautas projekcijas. Tomografinis

matavimo metodas sudarytas iš dviejų pagrindinių etapų – duomenų surinkimo ir vaizdo rekonstrukcijos. Šiuo atveju talpyklos dugno tyrimui atlikti buvo pasirinkta taikyti tomografinį rekonstrukcinį metodą, pagrįstą filtruotos atgalinės projekcijos taikymu, naudojant vėduoklinę projekcinių duomenų surinkimo konfigūraciją.

Projekcinių duomenų surinkimas vienai iš projekcijų yra atliekamas žadinant vieną siųstuvą ir registruojant signalus, imtuvus išdėsčius priešingoje 180° talpyklos srityje ant dugno krašto. Projektija šiuo atveju yra apibrėžiama kaip nukreiptųjų ultragarso bangų simetrinės S_0 bangos modos amplitudės $A(n, m)$ kitimas išilgai talpyklos dugno krašto priešingai siųstuvo padėčiai, kur $n = 1 \div N$, $m = 1 \div M$, N – bendras imtuvų skaičius vienai siųstuvo padėčiai, M – siųstuvo padėčių skaičius. Paprasčiausiu atveju, priimant prielaidą, kad talpyklos dugne nėra jokių suvirinimo siūlių (4.1 pav., *a*), projektija vienai siųstuvo padėčiai yra pateikiama 4.1 pav., *b* dalyje. Šiuo atveju apskritos sritys su skirtingomis slopinimo vertėmis ($\emptyset 0,1$ m – 5 dB/m; $\emptyset 0,2$ m – 3 dB/m; $\emptyset 0,4$ m – 1 dB/m) pateikiamame modelyje buvo naudojamos skirtingo lygio korozijos sukeltiems defektams atspindėti.



4.1 pav. Talpyklos dugnas su didesnio slopinimo sritimis, kai nėra suvirinimo siūlių (*a*); projektija vienai siųstuvo padėčiai (*b*)

Remiantis tomografinio rekonstrukcinio algoritmo reikalavimu, prieš rekonstrukciją yra atliekamas kiekvienos projekcijos filtravimas. Dažniausiai filtravimas yra atliekamas įprastiniu (*ramp*) filtru, apibrėžiamu žemiau pateikiama išraiška:

$$H_T(f_x) = \begin{cases} f_x & |f_x| < f_{x,\max} \\ 0 & \text{kitu atveju} \end{cases}, \quad (4.1)$$

čia f_x yra erdvinis dažnis, $f_{x,\max} = 1/2d_x$ – maksimalus dažnis (viršutinė analizuojamų dažnių riba), d_x – atstumas tarp keitiklių. Projekcijos filtravimas yra atliekamas dažnių srityje, taikant žemiau pateikiamą išraišką

$$A_F(n, m) = \text{Re} \left\{ \text{FT}^{-1} \left[\text{FT}_n[A(n, m)] \cdot H_T(f_x) \right] \right\}, \quad (4.2)$$

čia FT^{-1} yra atvirkštinė Furjė transformacija, $\text{FT}_n[A(n, m)]$ – tiesioginė Furjė transformacija. Tačiau toks filtras nulemia stiprių triukšmų atsiradimą filtruotoje projekcijoje, kuriuos sukelia statistinio triukšmo stiprinimas net esant tolygiai projekcijai. Todėl, norint sumažinti aukšto dažnio triukšmo poveikį, filtruojamoje projekcijoje kartu buvo pritaikytas žemų dažnių (glotninantis) filtras. Šis filtras yra aprašomas žemiau pateikiama išraiška:

$$H_{sf}(f_x) = \begin{cases} e^{-a_{sf}(f_x - (f_{sf0} - \Delta f_{sf}))^2} & |f_x| < f_{sf0} - \Delta f_{sf} \\ 1 & \text{kitu atveju} \end{cases}, \quad (4.3)$$

čia f_{sf0} yra glotninančio filtro ribinis dažnis 6 dB lygyje, $a_{sf} = -\frac{\ln 0,5}{\Delta f_{sf}^2}$. Tuomet

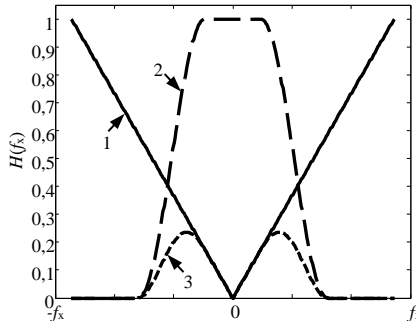
koreguotas tomografinis filtras:

$$H_{Tc}(f_x) = H_T(f_x) \cdot H_{sf}(f_x). \quad (4.4)$$

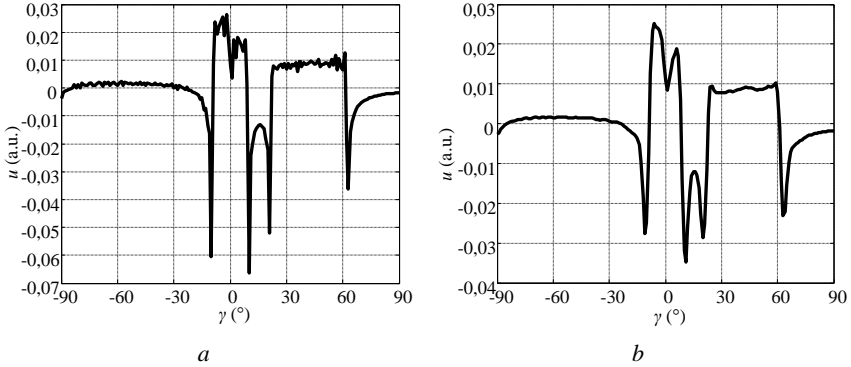
Filtrų dažninės charakteristikos yra pateikiamos 4.2 pav. Taikant koreguotą filtrą, projekcijos filtravimas išreiškiamas žemiau pateikiama formule:

$$A_{Fsf}(n, m) = \text{Re} \left\{ \text{FT}^{-1} \left[\text{FT}_n[A(n, m)] \cdot H_{Tc}(f_x) \right] \right\}. \quad (4.5)$$

Filtruota projekcija vienai siūstovo padėčiai, taikant įprastinį tomografinį filtrą ir koreguotą tomografinį filtrą, yra pateikiami 4.3 pav.



4.2 pav. Tomografinių filtrų dažninės charakteristikos: 1 – įprastinis tomografinis filtras $H_T(f_x)$, 2 – glotninantis filtras $H_{sf}(f_x)$, 3 – koreguotas tomografinis filtras $H_{Tc}(f_x)$



4.3 pav. Filtruota projekcija taikant įprastinį tomografinį filtrą $H_T(f_x)$ (a), filtruota projekcija taikant koreguotą tomografinį filtrą $H_{Tc}(f_x)$ (b)

Atgalinės projekcijos skaičiavimas yra atliekamas sukuriant talpyklos dugno masyvą, kuris yra aprašomas žemiau pateikiama išraiška:

$$\{x_{\text{tf}}(n_x, n_y), y_{\text{tf}}(n_x, n_y), \alpha_{\text{tf}}(n_x, n_y)\}, \quad (4.6)$$

čia n_x, n_y – taškų skaičius x ir y ašių kryptimis; $x_{\text{tf}}, y_{\text{tf}}$ – erdvinės šių taškų koordinatės, α_{tf} – rekonstruotas slopinimo koeficientas (dB/m) virtualaus taško padėtyje. Skaičiavimų pradiniam etape yra priimta, kad slopinimo koeficientas $\alpha_{\text{tf}} = 0$ visiems taškams. Kitu etapu yra atliekamas kiekvienos filtruotos projekcijos atgalinis projektavimas. Atgalinės projekcijos skaičiavimas atliekamas šiais etapais:

- 1) Kiekvienas bangos sklidimo kelias tarp siūstuvo ir imtuvo yra aprašomas tiesine lygtimi:

$$A_{\text{BP}}(n, m) \cdot x + B_{\text{BP}}(n, m) \cdot y + C_{\text{BP}}(n, m) = 0, \quad (4.7)$$

čia $A_{\text{BP}}(n, m) = y_{\text{Rv}}(n, m) - y_{\text{Tr}}(n, m)$, $B_{\text{BP}}(n, m) = -[x_{\text{Rv}}(n, m) - x_{\text{Tr}}(n, m)]$, $C_{\text{BP}}(n, m) = A_{\text{BP}}(n, m) \cdot x_{\text{Tr}}(n, m) - B_{\text{BP}}(n, m) \cdot y_{\text{Tr}}(n, m)$.

- 2) Atliekamas atstumo tarp kiekvieno virtualaus talpyklos vaizdo taško ir atgalinės projekcijos nustatymas:

$$D_{\text{BP}}(n, m, n_x, n_y) = \frac{|A_{\text{BP}}(n, m) \cdot x_{\text{tf}}(n_x, n_y) - B_{\text{BP}}(n, m) \cdot y_{\text{tf}}(n_x, n_y) + C_{\text{BP}}(n, m)|}{\sqrt{A_{\text{BP}}^2(n, m) - B_{\text{BP}}^2(n, m)}}. \quad (4.8)$$

- 3) Kiekvienam virtualiam taškui artimiausias indeksas kiekvienoje projekcijoje yra nustatomas:

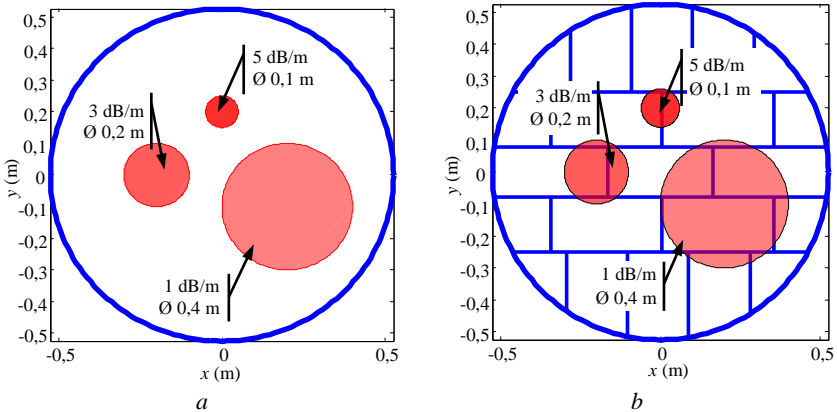
$$K_{\min}(m, n_x, n_y) = \arg \min_n [D_{\text{BP}}(n, m, n_x, n_y)]. \quad (4.9)$$

- 4) Atliekant integravimą artimiausiame virtualiame taške, yra gaunamas slopinimo pasiskirstymo vaizdas

$$\alpha_{\text{tf}}(n_x, n_y) = \sum_{m=1}^M A(K_{\min}(m, n_x, n_y), m). \quad (4.10)$$

Tomografinės rekonstrukcijos metodo tyrimas

Siekiant iširti pateikiamo tomografinio rekonstrukcinio metodo galimybes, buvo atlikti tyrimai naudojant darbe pateikiamą sudarytąjį talpyklos dugno modelį. Slopinimo verčių žemėlapis buvo sudarytas įvedant 3 apskritus defektus į sudarytą dugno modelį, turinčius skirtingas slopinimo vertes. Tyrimas buvo atliktas priėmus du ribinius talpyklos dugno atvejus – kai talpyklos dugne nėra jokių suvirinimo siūlių ir kai talpyklos dugnas sudarytas iš atskirų tarpusavyje suvirintų lakštų. Pirmu atveju (4.4 pav., *a*), tyrimo metu buvo priimta prielaida, kad plokštelės slopinimas yra labai mažas (0,05 dB/m) nesurūdijusiose talpyklos dugno srityse ir nėra slopinimo ant talpyklos dugną sudarančių suvirinimo siūlių. Antru atveju (4.4 pav., *b*) buvo priimta prielaida, kad plokštelės slopinimas yra 0,05 dB/m nesurūdijusiose talpyklos dugno srityse ir slopinimo vertė ant suvirinimo siūlių yra 2 dB.



4.4 pav. Talpyklos dugno modelis su pažymėtomis skirtingo slopinimo korozijos pažeistomis sritimis, kai: *a* – talpyklos dugne nėra jokių suvirinimo siūlių, *b* – talpyklos dugnas sudarytas iš atskirų suvirintų lakštų

Bendru atveju, taikant tomografinę rekonstrukciją, yra gaunami santykiniai amplitudės įverčiai, kurie nėra susiję su pateikiamame modelyje esamomis slopinimo vertėmis. Siekiant išspręsti šią problemą, darbe buvo pasiūlytas papildomas etapas pateikiamame tomografinės rekonstrukcijos algoritme. Jis yra pagrįstas hipoteze, kad originali projekcija turėtų sutapti su projekcija, gauta iš rekonstruoto slopinimo lauko. Taigi tai reiškia, kad turi egzistuoti tokia korekcinė schema, leidžianti keisti rekonstruotą slopinimo lauką taip, kad projekcija,

gaunama iš rekonstruoto paveikslo, ir originali projekcija sutaptų viena su kita. Pradinės projekcijos $A_M(n, m)$ ir projekcijos, gautos iš rekonstruoto vaizdo $A_{M,Rec}(n, m)$, sutapdinimas buvo atliktas esant šiems etapams:

- 1) Priimama, kad egzistuoja tiesinė korekcija. Tai reiškia, kad kiekvienai projekcijai egzistuoja koeficientai k_1 ir k_2 :

$$A_M(n, m) = A_{M,Rec}(n, m) \cdot k_1 + L(n, m_k) \cdot k_2. \quad (4.11)$$

čia, $L(n, m)$ yra atstumas tarp siųstuvo ir imtuvo m_k – projekcija, pasirinkta optimizavimui.

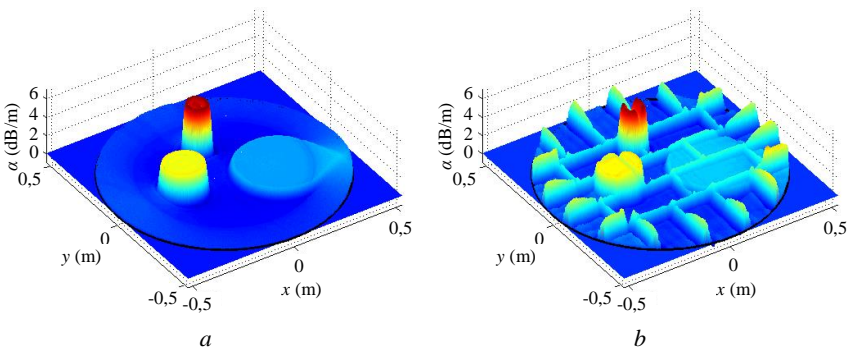
- 2) Koeficientų k_1 ir k_2 nustatymas yra atliekamas naudojant optimizaciją, taikant žemiau pateikiamą tikslo funkciją:

$$F(k_1, k_2) = \arg \min_{k_1, k_2} \left\{ \left[A_M(n, m) - A_{M,Rec}(n, m) \cdot k_1 + L(n, m_k) \cdot k_2 \right]^2 \right\}. \quad (4.12)$$

- 3) Optimizacija atliekama atskirai kiekvienai projekcijai, naudojant vidutinę korekcijos koeficientų vertę. Galiausiai po rekonstrukcijos gautasis vaizdas yra koreguojamas remiantis žemiau pateikiama išraiška:

$$\alpha_{lf,cor}(n_x, n_y) = \alpha_{lf}(n_x, n_y) \cdot k_1 + k_2. \quad (4.13)$$

Taikant siūlomą pakoreguotą tomografinį rekonstrukcinį metodą gauti rekonstruoti slopinimo pasiskirstymo paveikslai abiem tirtais talpyklos dugno modelio atvejais yra pateikiami 4.5 pav.



4.5 pav. Rekonstruotas slopinimo pasiskirstymas talpyklos dugno modelyje, kai talpyklos dugne nėra jokių suvirinimo siūlių (a); talpyklos dugnas sudarytas iš atskirų suvirintų lakštų (b)

Siekiant įvertinti slopinimo rekonstrukcijos tikslumą, buvo atliktas šių parametų skaičiavimas:

1. Vidutinė rekonstruota slopinimo vertė:

$$\bar{\alpha}_{cd,rec} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \alpha_{cd,rec}^k, \quad (4.15)$$

čia, $\alpha_{cd,rec}$ – rekonstruota defekto slopinimo vertė; $k = 1 \div K$, kur K – taškų skaičius virtualioje talpyklos dugno plokštumoje, apribotoje defekto.

2. Rekonstruotos slopinimo vertės standartinis nuokrypis:

$$\sigma_{\alpha_{cd,rec}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (\alpha_{cd}^k - \alpha_{cd,rec}^k)^2}{K - 1}}, \quad (4.16)$$

čia α_{cd} – teorinė korozijos pažeistos srities slopinimo vertė sudarytame talpyklos dugno modelyje.

3. Vidutinė korozijos pažeistos talpyklos dugno srities slopinimo rekonstrukcijos absoliutinė paklaida:

$$\bar{\Delta}_{\alpha_{cd,rec}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\alpha_{cd}^k - \alpha_{cd,rec}^k). \quad (4.17)$$

4. Vidutinė korozijos pažeistos talpyklos dugno srities slopinimo rekonstrukcijos santykinė paklaida:

$$\delta_{\alpha_{cd,rec}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\alpha_{cd}^k - \alpha_{cd,rec}^k}{\alpha_{cd,rec}^k} \cdot 100\%. \quad (4.18)$$

Gautos vidutinės rekonstruotos slopinimo, standartinio nuokrypio, absoliutinės ir santykinės paklaidos vertės yra pateikiamos 4.1 ir 4.2 lentelėse.

4.1 lentelė. Defektų rekonstravimo tikslumo palyginimas sudarytame talpyklos dugno modelyje, kai nėra nuostolių ant suvirinimo siūlių

Sritis	α_{dc} , dB/m	$\bar{\alpha}_{cd,rec}$, dB/m	$\sigma_{\alpha_{cd,rec}}$, dB/m	$\bar{\Delta}_{\alpha_{cd,rec}}$, dB/m	$\delta_{\alpha_{cd,rec}}$, %
1	5,05	4,98	0,264	-0,067	1,35
2	3,05	2,99	0,104	-0,061	2,04
3	1,05	0,96	0,052	-0,094	9,77

4.2 lentelė. Defektų rekonstravimo tikslumo palyginimas sudarytame talpyklos dugno modelyje, esant nuostoliams ant suvirinimo siūlių

Sritis	α_{dc} , dB/m	$\bar{\alpha}_{cd,rec}$, dB/m	$\sigma_{\alpha_{cd,rec}}$, dB/m	$\bar{\Delta}_{\alpha_{cd,rec}}$, dB/m	$\delta_{\alpha_{cd,rec}}$, %
1	4,62	4,3	0,661	-0,32	7,43
2	2,92	2,73	0,232	-0,192	7,04
3	1,14	1,03	0,212	-0,114	11,05

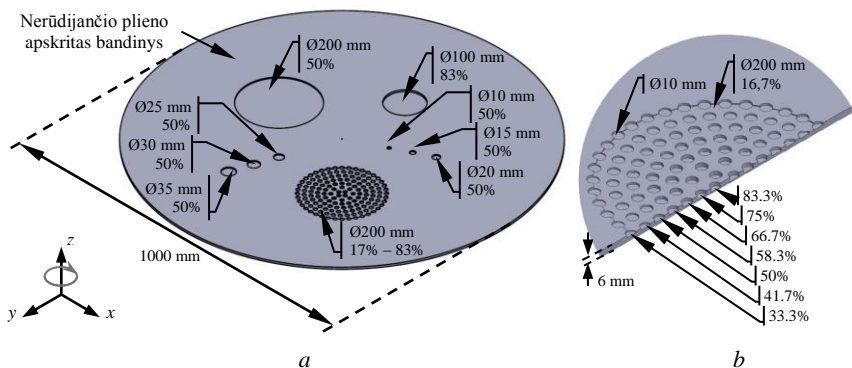
Atliktu modeliavimu buvo nustatyta, kad, taikant darbe pateikiamą pakoreguotą tomografinį rekonstrukcinį metodą tikrosioms slopinimo vertėms atkurti ir 4.5 pav., *a*, pateikiamą talpyklos dugno modelį (kai nėra suvirinimo siūlių), slopinimo vertės gali būti rekonstruotos esant vidutinei 1–2 proc. santykinei paklaidai. Tuo tarpu atlikus tyrimą taikant 4.5 pav., *b*, pateikiamą talpyklos dugno modelį, esant slopinimui ant talpyklos dugną sudarančių suvirinimo siūlių, vidutinė korozijos pažeistos talpyklos dugno srities tikrosios slopinimo vertės atkūrimo santykinė paklaida išauga iki 7 proc. Rekonstrukcijos santykinės paklaidos išaugimas gali būti paaiškinamas atsirandančiu staigiu slopinimo profilio pokyčiu korozijos pažeistos srities ir suvirinimo siūlės sankirtoje.

5. EKSPERIMENTINIS NUKREIPTŪJŲ ULTRAGARSO BANGŲ TOMOGRAFINĖS REKONSTRUKCIJOS TYRIMAS

Šiame skyriuje yra pateikiami atlikti eksperimentiniai tyrimai naudojant specialiai pagamintą nerūdijančio plieno 1 m diametro, 6 mm storio bandinį su jame esančiais dirbtiniais defektais korozijos nulemtam storio sumažėjimui imituoti. Taip pat šiame skyriuje pateikiami eksperimentinių tyrimų rezultatai, atlikti naudojant sumažinto dydžio talpyklos maketą ir kartu pateikiami taikant nukreiptųjų ultragarso bangų tomografinę rekonstrukciją gauti simetrinės S_0 modos slopinimo pasiskirstymo talpyklos dugne vaizdai.

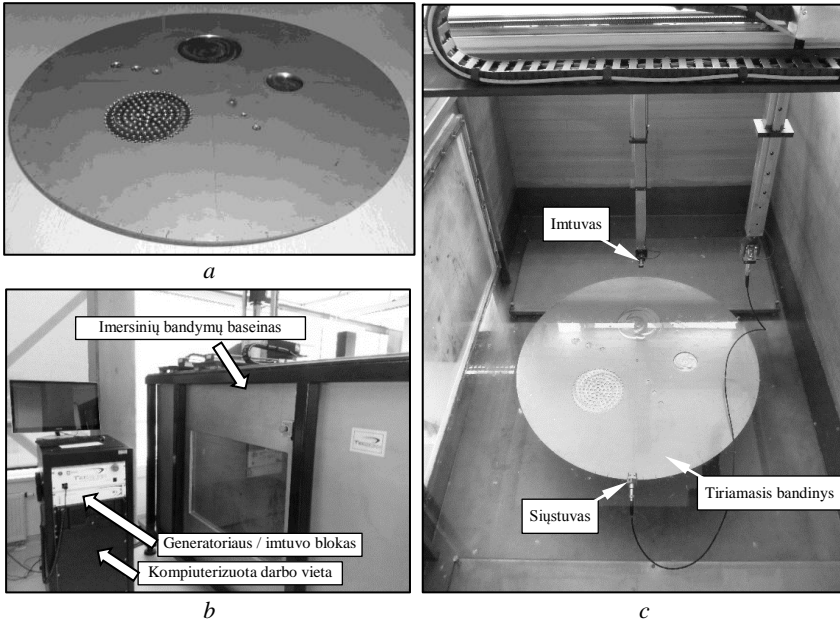
Tomografinės rekonstrukcijos algoritmo tyrimas naudojant kalibruotą bandinį

Pateikiamo eksperimentinio tyrimo tikslas – nukreiptųjų ultragarso bangų tomografinio rekonstrukcinio metodo, skirto defektams aptikti, ir erdvinio slopinimo pasiskirstymo nustatymo verifikavimas. Šiam tikslui pasiekti buvo atlikti eksperimentiniai matavimai naudojant apskritą 1 m diametro, 6 mm storio nerūdijančio plieno bandinį su jame esančiais žinomų parametrų dirbtiniais defektais, imituojančiais korozijos sukeltą objekto storio sumažėjimą. Tyrimams atlikti naudoto kalibruoto bandinio modelis yra pateikiamas 5.1 pav., *a*. Dirbtiniai defektai buvo gauti išfrezuojant dalies bandinio storio skirtingo gylio apskritumus, kurie atitinkamai buvo – 100 mm diametro ir atitiko 83 proc. bendro bandinio storio sumažėjimą, 200 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm diametro ir atitinka 50 proc. bendro bandinio storio sumažėjimą. Taip pat tiriamame nerūdijančio plieno bandinyje buvo išskirta 200 mm diametro sritis, sudaryta iš daugelio mažesnių 10 mm diametro defektų, kurioje bendras storio sumažėjimas kinta nuo 17 proc. iki 83 proc. (žr. 5.1 pav., *b*).



5.1 pav. 6 mm storio ir 1 m diametro nerūdijančio plieno bandinys su dirbtiniais defektais korozijos sukeltiems defektams imituoti (a); kintamo gylio defekto skerspjūvis (b)

Eksperimentiniai nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo ir sąveikos su bandinyje esamais dirbtiniais defektais tyrimai buvo atlikti naudojant matavimų stendą, pateikiamą 5.2 pav. Tyrimai buvo atlikti naudojant *TecScan Systems Inc. TCIS-3000* 11-ašių pramoninį skenerį (žr. 5.2 pav., b). Eksperimentiniai matavimai buvo atlikti taikant imersinį tyrimų metodą, tiriamąjį bandinį panardinus į vandens užpildytą matavimų baseiną. Nukreiptųjų ultragarso bangų žadinimas ir registravimas buvo atliktas naudojant *Panometrics-NDT V318-SU* imersinius ultragarsinius keitiklius, kurių centrinis dažnis 450 kHz. Nukreiptųjų ultragarso bangų žadinimas buvo atliekamas fiksuojant siūstuvą tiesiogiai prie tiriamojo nerūdijančio plieno bandinio krašto. Duomenų surinkimas atliktas taikant vėduoklinę projekcinių duomenų surinkimo konfigūraciją, imtuvui esant 70 mm atstumu nuo bandinio krašto. Matavimai buvo atlikti 180° tiriamo bandinio srityje, esant 1° bandinio pasukimo kampui. Atstumas tarp gretimų siūstuvo padėčių 5°. Tyrimų metu iš viso buvo sukauptos 73 projekcijos, būtinos tomografinėi rekonstrukcijai atlikti.



5.2 pav. Nerūdijančio plieno 6 mm storio bandinys su dirbiniais defektais (a), TCIS-3000 11-asių pramoninis skeneris (b), eksperimentinių tyrimų standas (c)

Taikant pateikiamą tyrimų schemą, gautas B tipo vaizdas vienoje ultragarso bangas žadinančio siūstuvo padėtyje yra pateikiamas 5.3 pav., a. Siekiant išskirti darbe nagrinėjamą nukreiptųjų ultragarso bangų simetrinę S_0 modą iš užregistruotų signalų, buvo pritaikytas laike kintantis langas. Laike kintamo lango nustatymas aprašomas žemiau pateikiamais žingsniais:

1. Apskaičiuojami signalų dažnio spektrai kiekvienoje imtuvo padėtyje, naudojant Furjė transformaciją:

$$U_k^n(f) = \text{FT}[u_k^n(t)], \quad (5.1)$$

čia $n = 1 \div N_{Tr}$, N_{Tr} – bendras siūstuvo padėčių skaičius; $k = 1 \div N_{Rc}$, N_{Rc} – bendras imtuvo padėčių skaičius.

2. Dažnio spektrai filtruojami naudojant gausinės formos filtrą:

$$U_{k,F}^n(f) = U_k^n(f) \cdot H(f - f_b), \quad (5.2)$$

čia $H(f) = e^{-K(f-f_b)^2}$, $K = \frac{4 \ln 0,5}{\Delta f^2}$, Δf – filtro dažnių juostos plotis

($\Delta f = 100$ kHz), f_b – filtro centrinis dažnis ($f_b = 120$ kHz).

3. Nufiltruoti signalai atkuriami naudojant atvirkštinę Furjė transformaciją:

$$u_{k,F}^n(t) = \text{FT}^{-1} \left[U_{k,F}^n(f) \right]. \quad (5.3)$$

4. Pradinis laike kintamo lango taškas randamas taikant perėjimo per nulį metodą:

$$t_{L,k}^n = \min \left\{ \arg \left[u_{k,F}^n(t) > U_L \right] \right\}, \quad (5.4)$$

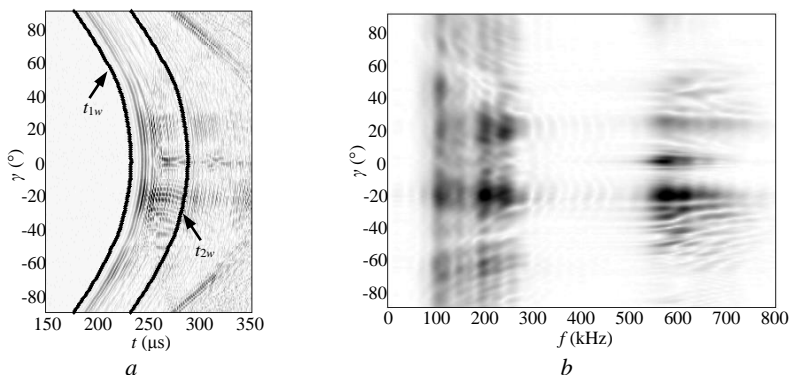
$$t_{1w,k}^n = \max \left\{ \arg \left[u_{k,F}^n(t) = 0 \right] \right\}, \quad t_{1w,k}^n < t_{L,k}^n, \quad (5.5)$$

čia $t_{L,k}^n$ – laiko momentas, kuriam esant signalas $u_{k,F}^n(t)$ viršija slenkstinį lygį U_L , $t_{1w,k}^n$ – nustatytas signalo $u_{k,F}^n(t)$ perėjimo per nulį momentas.

5. Galinis laike kintamo lango taškas nustatomas prie pradinio nustatyto perėjimo per nulį laiko momento pridėjus fiksuotą lango pločio vertę Δt_w (pateikiamo tyrimo atveju $\Delta t_w = 55 \mu\text{s}$).

$$t_{2w,k}^n = t_{1w,k}^n + \Delta t_w. \quad (5.6)$$

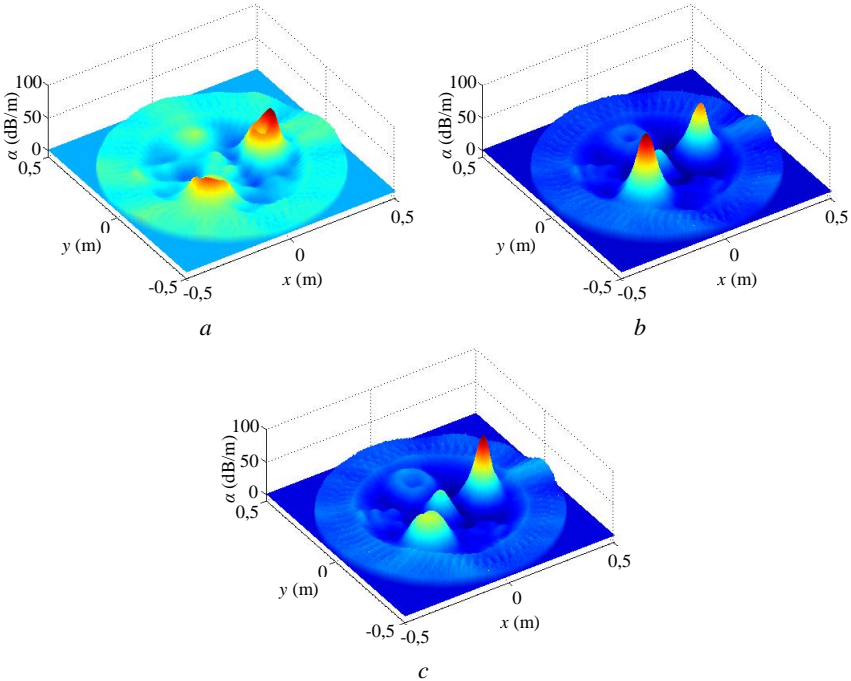
Siekiant nustatyti, kuriame dažnių diapazone buvo sugeneruota nagrinėjama nukreiptųjų ultragarso bangų S_0 moda, buvo atliktas signalų spektro skaičiavimas laike kintamu langu išskirtoje signalo dalyje. Gautas signalų spektro B tipo vaizdas yra pateikiamas 5.3 pav., *b*. Remiantis pateikiamais rezultatais nustatyta, kad tiriamame nerūdijančio plieno bandinyje simetrinė S_0 bangos moda buvo sugeneruota dviejuose – $100 \div 275 \text{ kHz}$ ir $550 \div 750 \text{ kHz}$ dažnių diapazonuose.



5.3 pav. Eksperimentiškai gautas tiriamajame bandinyje sklindančių nukreiptųjų bangų B tipo vaizdas (*a*); laikiniu langu išskirtų signalų spektras (*b*)

Kadangi ultragarsinių matavimų erdvinė skiriamoji geba ir jautrumas priklauso nuo nagrinėjamos bangos dažnio, laike kintamu langu išskirtiems signalams buvo pritaikytas dažnio filtravimo metodas, siekiant išskirti signalo komponentes, turinčias didžiausią amplitudę. Filtravimas buvo atliktas taikant

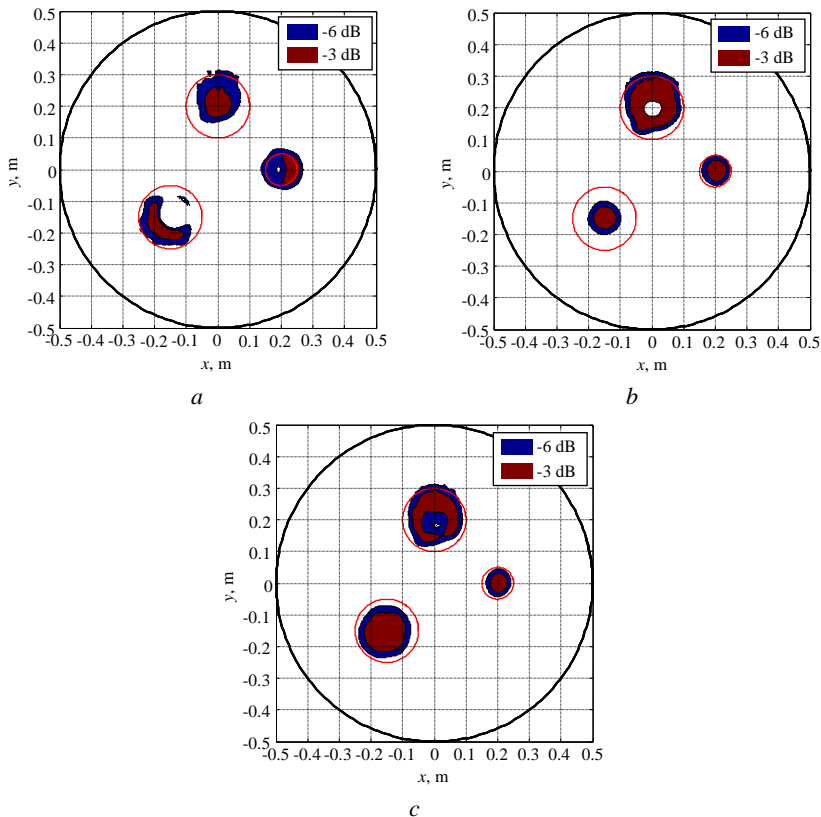
anksčiau pateiktas 5.1–5.3 išraiškas, esant filtro centriniam dažniui 110 kHz, 200 kHz ir 240 kHz. Filtro dažnio juostos plotis $\Delta f = 50$ kHz visais pateikiamais atvejais. Gauti eksperimentiniai nukreiptųjų ultragarso bangų simetrinės S_0 modos slopinimo pasiskirstymo 3D vaizdai, taikant darbe pateikiamą tomografinį rekonstrukcinį metodą, yra pateikiami 5.4 pav.



5.4 pav. Rekonstruotas nukreiptųjų ultragarso bangų S_0 modos slopinimo pasiskirstymas tiriamajame nerūdijančio plieno bandinyje su dirbtiniais defektais, esant 110 kHz (a), 200 kHz (b), 240 kHz (c) centriniam gausinio filtro dažniui

Bendru atveju atliktu eksperimentiniu tyrimu nustatyta, kad matavimų skiriamoji geba ir jautrumas didėja, mažėjant tyrimo metu naudojamų ultragarso bangų S_0 modos bangos ilgiui, dėl ko silpni slopinimo išaugimo pėdsakai, nulemti $\varnothing 25$ – $\varnothing 35$ mm diametro defektų, gali būti įžvelgiami 5.4 pav., c. Šiuo atveju atliktu tyrimu nustatyta, kad vidutinis slopinimas, nulemtas $\varnothing 100$ mm defekto, yra 42,7 dB/m, nulemtas $\varnothing 200$ mm defekto, yra 9,2 dB/m, nulemtas kintamo gylio $\varnothing 200$ mm defekto, yra 18,4 dB/m, esant 110 kHz centriniam filtro dažniui. Tuo tarpu, esant 200 kHz centriniam filtro dažniui, vidutinės slopinimo vertės atitinkamai buvo gautos: $\varnothing 100$ mm defekto – 41,7 dB/m, $\varnothing 200$ mm defekto – 9,2 dB/m, kintamo gylio $\varnothing 200$ mm defekto – 29,9 dB/m. Esant 240 kHz centriniam filtro dažniui, vidutinės slopinimo vertės atitinkamai buvo gautos: $\varnothing 100$ mm defekto – 47,8 dB/m, $\varnothing 200$ mm defekto – 9,2 dB/m, kintamo gylio

Ø200 mm defekto – 23,2 dB/m. Taip pat darbe buvo atliktas 2D Ø100 mm, Ø200 mm ir Ø200 mm kintamo gylio defektų dydžio nustatymas, esant -3 dB ir -6 dB slopinimo sumažėjimo lygiui. Gauti nustatyti defektų dydžiai yra pateikiami 5.5 pav. bei 5.1 ir 5.2 lentelėse.



5.5 pav. Defekto dydžio nustatymas esant -3 dB ir -6 dB slopinimo sumažėjimo lygiui, kai centrinis gausinio filtro dažnis 110 kHz (a), 200 kHz (b), 240 kHz (c)

5.1 lentelė. Defekto dydžio nustatymas, esant -3dB slopinimo sumažėjimo lygiui

Defekto diametras d_{cd} , mm	Defekto plotas A_{cd} , cm^2	Rekonstruotas defekto plotas A_{cdr} , cm^2		
		esant 110 kHz	esant 200 kHz	esant 240 kHz
200	314,16	61,78	193,12	132,05
100	78,54	38,26	32,08	25,25
200 (kintamo gylio)	314,16	53,87	39,53	132,23

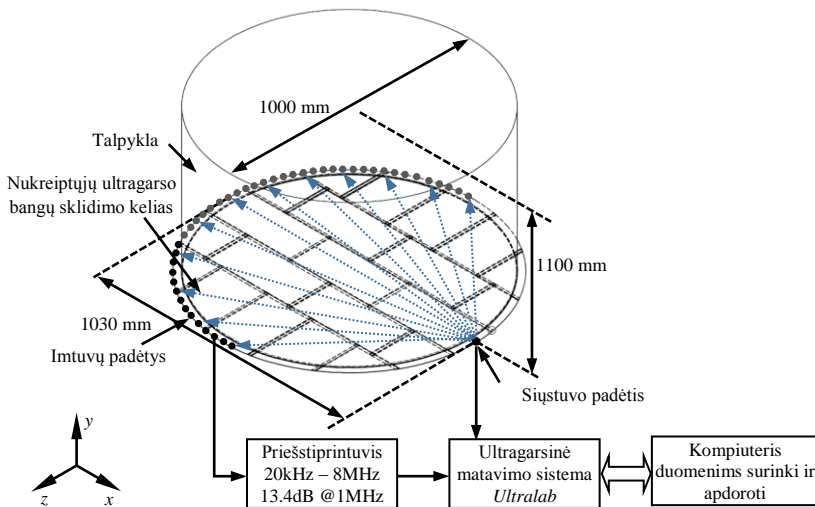
5.2 lentelė. Defekto dydžio nustatymas, esant -6dB slopinimo sumažėjimo lygiui

Defekto diametras d_{cd} , mm	Defekto plotas A_{cd} , cm ²	Rekonstruotas defekto plotas A_{cdr} , cm ²		
		esant 110 kHz	esant 200 kHz	esant 240 kHz
200	314,16	180,15	292,12	269,91
100	78,54	131,62	64,86	53,65
200 (kintamo gylio)	314,16	131,83	84,2	214,97

Atliktu 2D defektų dydžio nustatymu gauta, kad bendras defekto dydžio nustatymas yra nulemtas nukreiptųjų ultragarso bangų bangos ilgio. Nepaisant to, kad žemo dažnio nukreiptosios bangos gali skliti didesniais nuotoliais tiriamuosiuose objektuose, aukštesnių dažnių panaudojimas leidžia tiksliau nustatyti defekto dydį. Taip pat aukštesnių dažnių panaudojimas leidžia atlikti rekonstrukciją, esant didesnei erdvinei skiriamajai gebai.

Eksperimentinis sumažinto dydžio talpyklos maketo tyrimas, esant ribotam projekcijų skaičiui

Eksperimentinių tyrimų tikslas – ištirti nukreiptųjų ultragarso bangų simetrinės S_0 bangos modos sklidimą sumažinto dydžio talpyklos makete ir, panaudojant tomografinę rekonstrukcinę analizės metodą, atkurti erdvinį S_0 bangos modos slopinimo pasiskirstymą talpyklos dugne. Tyrimams atlikti taikyta eksperimentinių tyrimų schema ir sumažinto dydžio talpyklos maketas yra atitinkamai pateikiami 5.6 ir 5.7 pav.



5.6 pav. Eksperimentinių tyrimų schema nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo sumažinto dydžio talpyklos makete tyrimui atlikti



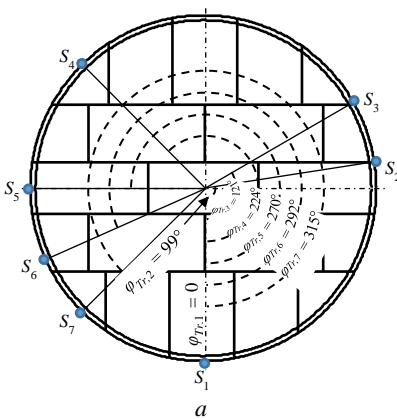
a



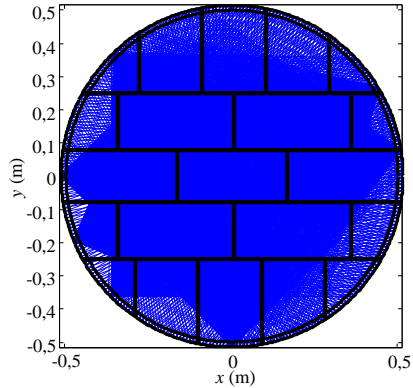
b

5.7 pav. Sumažinto dydžio talpyklos maketas (a), talpyklos dugno struktūra (b)

Nukreiptųjų ultragarso bangų simetrinės S_0 bangos sklidimo sumažinto dydžio talpyklos makete eksperimentinis tyrimas buvo atliktas naudojant žemo dažnio ultragarsinę matavimo sistemą *Ultralab*, sukurtą KTU Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institute. Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami naudojant žemo dažnio ultragarsinius keitiklius, virpančius storio modos virpesiais. Nukreiptųjų ultragarso bangų žadinimas tiriamajame objekte buvo atliekamas 400 kHz dažnio, 3 periodų trukmės 500 V amplitudės stačiakampiu impulsu. Kiekvienai siūstovo padėčiai buvo naudojamos 158 imtuvų padėtys, atitinkančios 180° talpyklos dugno sritį. Eksperimentinių tyrimų metu iš viso buvo surinktos 7 projekcijos. Siūstovo padėtys eksperimentinių tyrimų metu ir talpyklos dugno perdengiamumas yra pateikiami 5.8 pav.



a



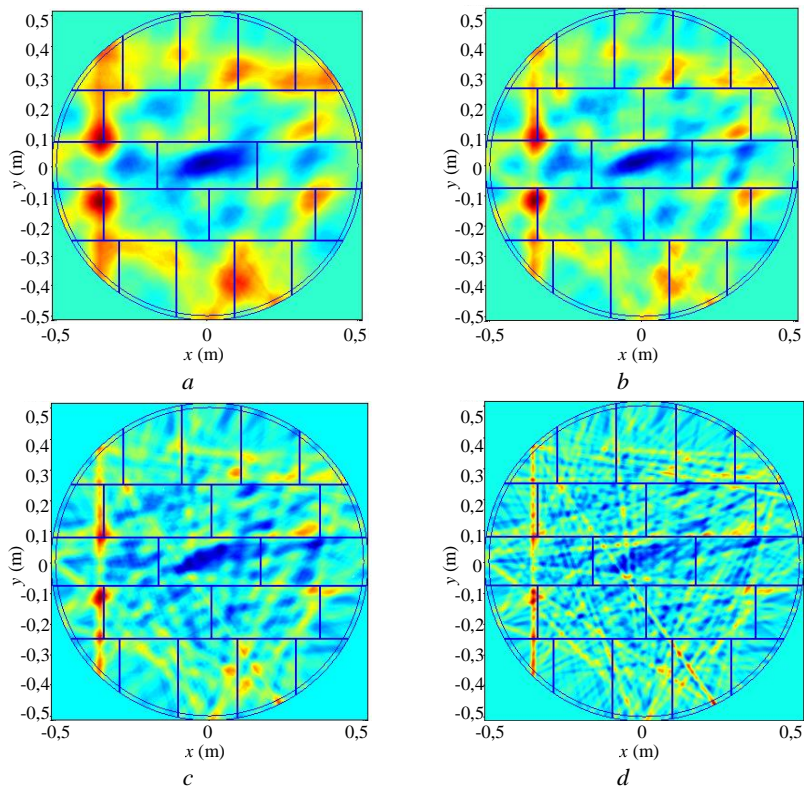
b

5.8 pav. Talpyklos dugnas su pažymėtomis siūstovo padėtimis (a); visos matavimo padėtys ir talpyklos dugno perdengiamumas (b)

Kaip buvo pateikta eksperimentinio sumažinto dydžio talpyklos maketo matavimo apraše, eksperimentinis projekcinių duomenų surinkimas buvo atliktas esant 158 imtuvo padėtims ir iš viso buvo išmatuotos 7 projekcijos. Dėl to tyrimų metu buvo gautas nepakankamas talpyklos dugną perdengiančių spindulių tinklas, būtinas tiksliai tomografinėi rekonstrukcijai pasiekti. Siekiant kompensuoti ši matavimų trūkumą ir supaprastinti atgalinės projekcijos procedūrą, virtualaus spindulio pločio parametras d_{beam} buvo įvestas atliekant tomografinę rekonstrukciją. Įvestasis virtualaus spindulio pločio parametras reiškia, kad atgalinė projekcija yra skaičiuojama ne tik linijoje tarp siūstovo ir imtuvo, bet ir srityje, apribotoje lygiagrečių linijų tarp keitiklių, esančių $\pm d_{\text{beam}}/2$ atstumu nuo matavimo ašies. Taip pat, atliekant tomografinę rekonstrukciją, buvo įvestas svorinis koeficientas K_d , priklausantis nuo atstumo nuo šios linijos:

$$K_d = \begin{cases} \frac{d_{\text{beam}}}{2} - d_p, & \frac{d_{\text{beam}}}{2} > d_p, \\ 0, & \text{kitu atveju} \end{cases} \quad (5.9)$$

čia d_p yra atstumas tarp taško virtualioje rekonstruojamoje plokštumoje ir siūstovo / imtuvo linijos. Eksperimentiškai gauti nukreiptųjų ultragarso bangų S_0 modos slopinimo pasiskirstymo sumažinto dydžio talpyklos dugno makete vaizdai, esant skirtingoms virtualaus spindulio pločio vertėms, yra pateikiami 5.9 pav.



5.9 pav. Nukreiptųjų ultragarso bangų S_0 modos slopinimo pasiskirstymas sumažinto dydžio talpyklos maketo dugne, kai virtualaus spindulio plotis $a - d_{\text{beam},1} = 0,075$ m, $b - d_{\text{beam},2} = 0,05$ m, $c - d_{\text{beam},3} = 0,025$ m, $d - d_{\text{beam},4} = 0,0125$ m. Raudona spalva žymi sritis, kuriose buvo gauta didesnė slopinimo vertė

Atliktu eksperimentiniu nukreiptųjų ultragarso bangų sklaidimo sumažinto dydžio talpyklos makete tyrimu nustatyta, kad, taikant pateikiamą tomografinį rekonstrukcinį metodą, santykinis simetrinės S_0 bangos modos slopinimo erdvinis pasiskirstymas talpyklos dugne gali būti atkurtas. Vis dėlto sąlyginai mažas eksperimentiškai išmatuotų projekcijų skaičius ir sąlyginai didelis skenavimo žingsnis tarp atskirų matavimo pozicijų lemia nepakankamą skiriamąją gebą konkrečioms suvirinimo siūlėms nustatyti ir leidžia atkurti tik dideles sritis su didesniu slopinimu. Nepaisant to, koreliacija tarp sričių su didesniais nuostoliais ir suvirinimo siūlių pozicijomis gali būti išvelgiama pateikiamuose slopinimo pasiskirstymo talpyklos dugno vaizduose.

IŠVADOS

1. Atlikus literatūros analizę pastebėta, kad šiuo metu taikomi talpyklų dugno defektų aptikimo ir jų parametrų matavimo metodai leidžia nustatyti defektus tik lokaliai ir reikalauja didelių laiko sąnaudų, kadangi prieš atliekant patikrą talpyklos turi būti ištuštinamos ir išvalomos. Šiuo atžvilgiu vienas metodų, kuris leidžia patikrinti ar bent įvertinti korozijos lygį talpyklose, yra matavimo metodas, pagrįstas nukreiptųjų bangų taikymu kartu su ultragarso praėjimo tomografija. Atlikus analizę nustatyta, kad šis metodas suteikia galimybę gauti erdvinį 2D korozijos pasiskirstymą.
2. Buvo sukurtas modifikuotas nukreiptųjų ultragarso bangų praėjimo tomografijos metodas, leidžiantis atkurti tikrąsias slopinimo vertes ir jo erdvinį pasiskirstymą talpyklos dugne. Tikrųjų slopinimo verčių rekonstrukcija buvo pasiekta įvedant papildomą etapą į pateikiamą rekonstrukcijos algoritmą, paremtą optimizavimu.
3. Siūlomo ultragarso praėjimo tomografijos metodo verifikavimas buvo atliktas naudojant sukurtą talpyklos dugno modelį, leidžiantį įvertinti vidutinį slopinimą plokštėje, slopinimą korozijos apimtose talpyklos dugno srityse ir nuostolius, patiriamus dėl esamų suvirinimų. Gautais tyrimo rezultatais nustatyta, kad, taikant sudarytą talpyklos modelį, priėmus prielaidą, kad nėra nuostolių ant suvirinimo siūlių, tikrosios slopinimo vertės erdvinės rekonstrukcijos vidutinė santykinė paklaida siekia 2 proc. Rezultatai, gauti nagrinėjant talpyklos dugno modelį, esant slopinimui ant suvirinimo siūlių, parodė, kad vidutinė santykinė tikrųjų slopinimo verčių rekonstrukcijos paklaida išauga iki 7 proc. Šis santykinės rekonstrukcijos paklaidos išaugimas yra paaiškinamas staigiu slopinimo profilio pokyčiu korozijos apimtų sričių ir suvirinimo siūlių sankirtoje.
4. Atliktu 3D sumažintų matmenų talpyklos maketo tyrimu nustatyta, kad nėra esminio praėjimo nuostolių išaugimo nukreiptosioms ultragarso bangoms sklindant tam tikru kampu suvirinimo siūlės atžvilgiu. Tačiau kampas, kuriam esant yra galimas talpyklos dugnu praėjusių nukreiptųjų ultragarso bangų registravimas priešingoje talpyklos pusėje, dėl bangų, sklindančių tiesiogiai talpyklos sienele, yra apribotas apytiksliai iki 180° . Remiantis modeliavimo rezultatais nustatyta, kad pagrindiniai praėjimo nuostoliai yra patiriami dėl talpyklos dugną sudarančių suvirinimo siūlių ir bangų difrakcijos. Šiuo atžvilgiu, įvertinant realius talpyklų matmenis, tikėtinas nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo nuotolis yra apribotas iki 20–30 m.
5. Atliktu baigtinių elementų modeliavimu nustatyta, kad nukreiptųjų ultragarso bangų simetrinės S_0 modos praėjimo nuostoliai, esant užleistiniam suvirinimui, kinta nuo 1 dB iki 8 dB suvirinimui, priklausomai nuo užleistinio sujungimo pločio Δl ir bangos ilgio λ . Modeliavimo metu nustatyta, kas yra svarbu praktiniu taikymo požiūriu, kad papildomas

sukibimas, nulemtas korozijos, gali iš esmės sumažinti perdavimo nuostolius. Tai paaiškina skirtumą tarp modeliavimo metu nustatyto slopinimo ir anksčiau atliktų matavimų ant realios talpyklos.

6. Darbe pateikiamo metodo verifikavimas buvo atliktas eksperimentiškai. Buvo atlikti dviejų tipų eksperimentiniai tyrimai ir nustatyta, kad:
 - a) atliktais eksperimentais, naudojant specialiai pagamintą apskritą nerūdijančio plieno bandinį su skirtingais dirbtiniais defektais, nustatyta, kad nuostoliai, nulemti didelio ploto storio sumažėjimo, iš esmės yra patiriami ant šių sričių ribų, ir tai gali būti pastebima ir įvertinama iš pateikiamų rekonstruotų vaizdų. Atlikus skyros ir jautrumo tyrimą nustatyta, kad defektai, kurių matmenys yra artimi bangos ilgiui, gali būti aptinkami ir jų vertės atkuriamos taikant pateikiamą metodą.
 - b) eksperimentiniai matavimai, atlikti naudojant sumažinto dydžio talpyklos maketą, patvirtino modeliavimo rezultatus ir parodė panašius bangų sklidimo dėsningumus, nukreiptosioms ultragarso bangoms sklindant tam tikru kampu suvirinimo siūlės atžvilgiu, ir tai, kad tomografinė rekonstrukcijai būtinų projekcijų registravimas yra apribotas iki 180°. Vis dėlto sąlyginai mažas eksperimentiškai išmatuotų projekcijų skaičius lemia nepakankamą skiriamąją gebą konkrečioms suvirinimo siūlėms nustatyti ir leidžia atkurti tik dideles sritis su didesniu slopinimu.

LITERATŪROS SARAŠAS

1. BRITTON, C. F. Shreir's Corrosion B. COTTIS, et al. ed., Oxford: Elsevier, 2010 4.36 - *Corrosion Monitoring and Inspection*, pp. 3117-3166. ISBN 9780444527875.
2. TSUKADA, K., YOSHIOKA, M., KAWASAKI, Y., and KIWA, T. Detection of Back-Side Pit on a Ferrous Plate by Magnetic Flux Leakage Method with Analyzing Magnetic Field Vector. *NDT & E International*, 6, 2010, vol. 43, no. 4. pp. 323-328. ISSN 0963-8695.
3. KASAI, N., SEKINE, K., and MARUYAMA, H. Non-Destructive Evaluation Method for Far-Side Corrosion Type Flaws in Oil Storage Tank Bottom Floors using the Magnetic Flux Leakage Technique. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 2008, vol. 46, no. 2. pp. 126-132 ISSN 13468804.
4. KASAI, N., SEKINE, K., and MARUYAMA, H. Influence of Corrosion Products on Magnetic Flux Leakage Signals in Inspection of Far-Side Metal-Loss Defects in Oil Storage Tank Bottom Floors. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 2004, vol. 47, no. 1. pp. 19-26 ISSN 13468804.
5. KASAI, N., FUJIWARA, Y., SEKINE, K., and SAKAMOTO, T. Evaluation of Back-Side Flaws of the Bottom Plates of an Oil-Storage Tank by the RFECT. *NDT & E International*, 10, 2008, vol. 41, no. 7. pp. 525-529. ISSN 0963-8695.

6. KASAI, N., MATSUZAKI, S., and SAKAMOTO, T. Experimental and Analytical Study for Detectability of the Back-Side Flaws of Flat Ferromagnetic Plates by RFECT. *NDT & E International*, 12, 2011, vol. 44, no. 8. pp. 703-707. ISSN 0963-8695.
7. BAGAVATHIAPPAN, S., et al. Infrared Thermography for Condition Monitoring – A Review. *Infrared Physics & Technology*, 9, 2013, vol. 60, no. 0. pp. 35-55. ISSN 1350-4495.
8. MARINETTI, S., and VAVILOV, V. IR Thermographic Detection and Characterization of Hidden Corrosion in Metals: General Analysis. *Corrosion Science*, 3, 2010, vol. 52, no. 3. pp. 865-872. ISSN 0010-938X.
9. EDALATI, K., et al. The use of Radiography for Thickness Measurement and Corrosion Monitoring in Pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 10, 2006, vol. 83, no. 10. pp. 736-741. ISSN 0308-0161.
10. KOMAROV, K. L., SER'EZNOV, A. N., MURAV'EV, V. V., STEPANOVA, L. N. LEBEDEV, E., YU KABANOV, S. I., GERASHCHENKO, M. V. Acoustic Emission Method for Testing Oil and Gas Tanks. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2001, vol. 37, no. 3. pp. 232-237 ISSN 1061-8309.
11. KWON, J., LYU, G., LEE, T., and KIM, J. Acoustic Emission Testing of Repaired Storage Tank. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 5, 2001, vol. 78, no. 5. pp. 373-378. ISSN 0308-0161.
12. NOWAK, M., BARAN, I., SCHMIDT, J., and ONO, K. Acoustic Emission Method for Solving Problems in Double Bottom Storage Tanks. *Journal of Acoustic Emission*, 2009, vol. 27. pp. 272-280 ISSN 0730-0050.
13. ROSE, J. L. Ultrasonic Guided Waves in Structural Health Monitoring. *Key Engineering Materials*, 2004, vol. 270-273. pp. 14-21.
14. ZHAO, X., ROYER, R. L., OWENS, S.E., and ROSE, J.L. Ultrasonic Lamb Wave Tomography in Structural Health Monitoring. *Smart Materials and Structures*, 2011, vol. 20, no. 10. pp. 105002 ISSN 0964-1726.
15. LACKNER, G., and TSCHELIESNIG, P. Field Testing of Flat Bottomed Storage Tanks with Acoustic Emission - A Review on the Gained Experience. *Journal of Acoustic Emission*, 2004, vol. 22. pp. 201-207 ISSN 0730-0050.
16. LONG, F., and XU, H. *Validity Identification and Classification Technique of Tank Acoustic Emission Testing Signals Based on Clustering Analysis*. 2011 DOI 10.1109/FSKD.2011.6019805.
17. LOWE, M. J. S., ALLEYNE, D. N., and CAWLEY, P. Defect Detection in Pipes using Guided Waves. *Ultrasonics*, 2, 1998, vol. 36, no. 1-5. pp. 147-154. ISSN 0041-624X.
18. ALLEYNE, D. N., PAVLAKOVIC, B., LOWE, M. J. S., and CAWLEY, P. Rapid, Long Range Inspection of Chemical Plant Pipework using Guided Waves. *AIP Conference Proceedings*, 2001, vol. 557, no. 1. pp. 180-187.
19. DEMMA, A., et al. The Reflection of Guided Waves from Notches in Pipes: A Guide for Interpreting Corrosion Measurements. *NDT & E International*, 4, 2004, vol. 37, no. 3. pp. 167-180. ISSN 0963-8695.

20. LEINOV, E., LOWE, M. J. S., and CAWLEY, P. Investigation of Guided Wave Propagation and Attenuation in Pipe Buried in Sand. *Journal of Sound and Vibration*, 7/7, 2015, vol. 347, no. 0. pp. 96-114. ISSN 0022-460X.
21. ROSE, J. L., AVIOLI, M. J., MUDGE, P., and SANDERSON, R. Guided Wave Inspection Potential of Defects in Rail. *NDT & E International*, 3, 2004, vol. 37, no. 2. pp. 153-161. ISSN 0963-8695.
22. MOUSTAKIDIS, S., et al. An Intelligent Methodology for Railways Monitoring using Ultrasonic Guided Waves. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 12/01, 2014, vol. 33, no. 4. pp. 694-710 ISSN 0195-9298. DOI 10.1007/s10921-014-0264-6.
23. RAIŠUTIS, R., et al. Ultrasonic Guided Wave-Based Testing Technique for Inspection of Multi-Wire Rope Structures. *NDT & E International*, 3, 2014, vol. 62. pp. 40-49. ISSN 0963-8695.
24. LEGG, M., et al. Increased Range of Ultrasonic Guided Wave Testing of Overhead Transmission Line Cables using Dispersion Compensation. *Ultrasonics*, 9, 2015, vol. 62. pp. 35-45. ISSN 0041-624X.
25. KAŽYS, R., et al. 3D Analysis of Interaction of Lamb Waves with Defects in Loaded Steel Plates. *Ultrasonics*, 12/22, 2006, vol. 44, Supplement. pp. e1127-e1130. ISSN 0041-624X.
26. MAŽEIKA, L., KAŽYS, R., RAIŠUTIS, R., DEMČENKO, A. and ŠLITERIS, R. Long-Range Ultrasonic Non-Destructive Testing of Fuel Tanks. *DGZfP Proceedings BB 103-CD of ECNDT 2006*, 2006. pp. 1-8.
27. MAŽEIKA L., KAŽYS, R., RAIŠUTIS, R., ŠLITERIS, R. *Ultrasonic Guided Wave Tomography for the Inspection of the Fuel Tanks Floor*. Chania, Crete, Greece ed. 4th International Conference on NDT, 11–14 October 2007, 2007.
28. RAIŠUTIS, R., KAŽYS, R., MAŽEIKA, L., ŠLITERIS, R. Application of the Ultrasonic Transmission Tomography for Inspection of the Petroleum Tank Floor. *Ultragarsas (Ultrasound)*, 2007, vol. 62, no. 3. pp. 26-32 ISSN 1392-2114.
29. MAŽEIKA, L., KAŽYS, R., RAIŠUTIS, R., and ŠLITERIS, R. Ultrasonic Guided Wave Tomography for the Inspection of the Fuel Tanks Floor. *International Journal of Materials and Product Technology*, 01/01; 2016/08, 2011, vol. 41, no. 1-4. pp. 128-139 ISSN 0268-1900. DOI 10.1504/IJMPT.2011.040291.
30. CHEN, F., and WILCOX, P. D. The Effect of Load on Guided Wave Propagation. *Ultrasonics*, 12, 2007, vol. 47, no. 1–4. pp. 111-122. ISSN 0041-624X.
31. WILCOX, P., LOWE, M. and CAWLEY, P. The Effect of Dispersion on Long-Range Inspection using Ultrasonic Guided Waves. *NDT & E International*, 1, 2001, vol. 34, no. 1. pp. 1-9. ISSN 0963-8695.
32. XU, K., TA, D., SU, Z., and WANG, W. Transmission Analysis of Ultrasonic Lamb Mode Conversion in a Plate with Partial-Thickness Notch. *Ultrasonics*, 1, 2014, vol. 54, no. 1. pp. 395-401. ISSN 0041-624X.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Straipsniai, paskelbti Mokslo informacijos instituto (ISI Web of Science) pagrindinio sąrašo leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą

1. **Jankauskas, Audrius**; Mažeika, Liudas. Ultrasonic guided wave propagation through welded lap joints // Metals. Basel: MDPI AG. ISSN 2075-4701. 2016, vol. 6, iss. 12, p. [1-15]. [Science Citation Index Expanded (Web of Science)]. [IF: 1,574; AIF: 2,950; IF/AIF: 0,534; Q1; 2015 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2017)]. [Indėlis: 0,500]
2. **Jankauskas, Audrius**; Mažeika, Liudas; Draudvilienė, Lina; Genutis, Gediminas. Investigation of the lamb waves generation in isotropic plates using ultrasonic broadband transducers // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering. Kaunas: KTU. ISSN 1392-1215. 2013, Vol. 19, no. 8, p. 33-36. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Computers & Applied Sciences Complete; Central & Eastern European Academic Source]. [IF: 0,445; AIF: 1,812; IF/AIF: 0,246; Q4; 2013 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2016)]. [Indėlis: 0,250]

Santraukos mokslinių konferencijų medžiagoje

1. **Jankauskas A.**, Mažeika L., Kažys R. Application of the ultrasonic guided wave for the inspection of the fuel tank // 19th World Conference on Non-Destructive Testing: 2016 06 13-17, Miunchenas, Vokietija.
2. **Jankauskas A.**, Mažeika L. Investigation of the guided waves propagation through the lap joint // 11th European Conference on Non-Destructive Testing: 2014 10 06-10, Praha, Čekijos Respublika.
3. **Jankauskas A.**, Mažeika L. Investigation of the guided waves propagation through the “T” type and lap joints of the welded storage tank plates // International workshop: Nonlinear and Multiscale Dynamics of Smart Materials in Energy Harvesting: 2014 02 17-18, Liublinas, Lenkija.
4. **Jankauskas A.**, Mažeika L., Draudvilienė L. Investigation of the Lamb waves generation in isotropic plates using broadband ultrasonic transducers // 17th international conference Electronics 2013: 2013 06 17-19, Palanga, Lietuva.

INFORMACIJA APIE AUTORIŲ

Audrius Jankauskas gimė 1986 m. birželio 28 d., Didžiuliuose, Raseinių r.

Išsilavinimas

2005 m. – vidurinis, Ariogalos vidurinė mokykla.

2009 m. – elektronikos inžinerijos bakalauro kvalifikacinis laipsnis (elektronikos inžinerijos studijų programa), Kauno technologijos universitetas, Telekomunikacijų ir elektronikos fakultetas.

2011 m. – matavimų inžinerijos magistro kvalifikacinis laipsnis (metrologijos ir matavimų studijų (specializacija – ultragarsinė medžiagotyra) programa), Kauno technologijos universitetas, Telekomunikacijų ir elektronikos fakultetas.

2011–2016 m. – Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo instituto doktorantas (matavimų inžinerijos mokslo kryptis 10T), Kauno technologijos universitetas.

Darbo patirtis

2010–2013 m. – inžinierius, Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institutas, Kauno technologijos universitetas.

2013–2014 m. – projekto jaunesnysis mokslinis darbuotojas, Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institutas, Kauno technologijos universitetas.

2014 – jaunesnysis mokslinis darbuotojas, Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institutas, Kauno technologijos universitetas.

El.paštas: audrius.jankauskas@ktu.lt

ABSTRACT

Relevance of research and scientific problem

Detecting and quantifying corrosion-type damage is vital for the petrochemical industry. To ensure a high level of safety and reliability, the storage tank and its floor should be periodically maintained in order to avoid corrosion-related accidents when hazardous chemical materials might get into the environment and groundwater. Various non-destructive testing and evaluation (NDT&E) methods are available for the inspection of the construction elements in the petrochemical industry, such as penetrant testing [1], magnetic [1–4], eddy current [1, 5, 6], thermography [7, 8], radiographic testing [9], acoustic emission [10–12] and ultrasonic techniques [1, 13, 14] which help to avoid chemical spill accidents. The main problem related to the inspection of the construction elements in the petrochemical industry, namely, storage tanks and their floors, using conventional NDT methods is that, in most cases, the storage tank has to be emptied, cleaned and made safe for human entry before any inspection could be performed. Moreover, such operations are costly and time-consuming. To overcome these disadvantages, an acoustic emission testing of flat-bottomed storage tanks is used as a beneficial method for tank operators to obtain information about possible corrosion, or even leakage of stored products, and about the floor without emptying the tank. However, the acoustic emission method used for storage tank inspection suffers from background noise and sometimes is impractical [10–12, 15,16]. Therefore, a new and more efficient NDT method for the inspection of storage tank floor, defect localisation and parameter measurement without emptying the tank needs to be developed.

The most promising technique which enables inspection at relatively long distances (up to 100 m) is the ultrasonic inspection method, based on the use of guided waves (GW). Differently from conventional ultrasonic NDT methods, there is no need to scan the whole object locally while applying ultrasonic guided waves (UGW) unlike using traditional thickness gauging methods, which only measure directly beneath the probe and are laborious when large areas need to be scanned. By using GW, it is enough to attach the ultrasonic transducers in an easily accessible place for an object segment to be monitored, as it was successfully demonstrated in the long-range applications for rapid screening of pipes [17–20], rails [21, 22], transmission lines and steel strands [23, 24] for the detection of corrosion and other structural defects. These objects are typically tested in the pulse-echo mode; the transducer transmitting the GW along the structure and returning echoes indicating the presence of defects or other structural features in the 1D plane. In this regard, the defects in the tank floor need to be observed and evaluated in the 2D plane. An application of UGW for the inspection of storage tank floor in the 2D plane and an investigation of interaction between these waves with their construction features was demonstrated [25–29]. However, the results

of pilot investigations demonstrated only spatial distribution of attenuation in the tank floor without giving absolute values of the attenuation which could be related to the level of corrosion. Based on the results, it can be said that by applying the UGW inspection method, the object can be continuously monitored and defects can be detected, observing their size and location in the object, whereupon the information can be given about the construction stability and further exploitation.

By using UGW, the storage tank floor could be inspected from the outer perimeter of the tank which, together with tomographic reconstruction algorithms, enables to reconstruct a spatial view of the tank floor with the distribution of defects inside of it. The main benefits of these waves are that UGW can propagate quite long distances with significant low losses, low sensitivity to object curvature, a large number of modes, allowing to choose the most appropriate, etc. But the use of the UGW is complicated because of dispersion, mode conversion at plate overlap and object non-uniformities, energy leakage to the surrounding medium [30–32]. Measurements are also complicated due to multiple joints, such as shell-to-bottom (T-joint) and lap joint connections, and a excessive amount of weld seams inside storage tank floor, which directly affects the transmission efficiency of GW and propagation distance. As a result, at the moment it is particularly important to develop and investigate an ultrasonic measurement method, which will enable to detect and measure defects inside of the storage tank floor from an outer perimeter without emptying and cleaning of it.

Scientific-technological problem and working hypothesis

The scientific-technological problem that is solved in this work is as follows: how is it possible to assess the corrosion level of storage tank floors used in the petrochemical industry, accessing them only from the outside.

The work hypothesis follows from the formulation of the problem: the ultrasonic guided waves (UGW), in combination with tomographic reconstruction algorithms, should enable the assessment of the corrosion level accessing only from the outside of a storage tank.

Aim of the research is to develop and investigate a method of measurement that enables to detect and measure corrosion-caused defects inside of an aboveground storage tank floor without emptying and cleaning the storage tank.

Tasks of the research

In order to achieve the aim, the following tasks were formulated:

1. To analyse the methods used for detecting defects and measuring their parameters inside of a storage tank.
2. To develop numerical models for the investigation of propagation of the UGW in the tank floor and its construction elements and to assess the

expected losses, propagation distances, resolution, sensitivity and possible changes during exploitation.

3. To perform experimental verification of the developed models and investigation of the regularities observed by modelling.
4. To investigate the use of the UGW tomography technique and the development such technique which enables to detect damage in the storage tank floor and a selection of optimal parameters for tomographic reconstruction.
5. To perform theoretical and experimental verification of the proposed measurement method and to estimate the expected uncertainties.

Scientific novelty of the work

1. The regularities and parameters of the UGW in the case of their propagation through shell-to-bottom (T-joint) and lap joint connections used in the construction of storage tank floor.
2. The improved ultrasonic transmission tomography algorithm for the reconstruction of the true value of UGW attenuation spatial distribution using optimisation for each projection.
3. Spatial sensitivity and resolution of ultrasonic transmission tomography determined by modelling and experiments.

Practical value of the work

The ultrasonic guided waves (UGW) transmission tomography method developed in the dissertation can be applied in the industry and designed to detect and characterise corrosion-type defects in the storage tank floor. UGW transmission tomography is one feasible approach for inspecting areas with restricted access by transmitting GW through the area and then processing the measured wave field into an attenuation map of the storage tank floor and other planar structures.

Results presented for the defence of thesis

1. The regularities of the symmetric S0 UGW mode propagation through the shell-to-bottom (T-joint) and lap joint connections.
2. A modified algorithm of the ultrasonic transmission tomography that enables to obtain true values of attenuation of UGW and their spatial distribution.
3. A model of the storage tank floor for the verification of the tomographic reconstruction algorithm.
4. The experimental measurement results, resolution and sensitivity of estimated spatial attenuation distribution in the specially developed stainless steel sample with artificial defects.

5. The experimental measurement results of spatial attenuation distribution in a scaled-down storage tank mock-up floor, using the proposed ultrasonic transmission tomography algorithm with a limited number of projections.

Approbation of the results

During the research period, 2 scientific articles were published on the topic of dissertation in publications referred in the main list of the Institute of Scientific Information (ISI). The main results of the work were presented in 4 domestic and international scientific conferences held in Palanga, Lublin, Prague and Munich.

Structure and contents of the dissertation

The present doctoral dissertation consists of an introduction, five chapters of the main body, conclusions and a list of references. The dissertation contains 142 pages featuring 107 illustrations, 10 tables and 108 mathematical expressions. The list of references covers 178 items.

The introduction of the dissertation describes the relevance of the problem, the objective and tasks of the thesis, its scientific novelty and the scope of the practical application of the work, its research methodology and approbation of results.

In the first chapter, a review of the most common non-destructive testing (NDT) and measurement methods used for defect detection in the aboveground storage tanks (AST) and their floor are presented. The advantages and disadvantages of the presented measurement methods are discussed. Recent advances of the ultrasonic guided waves (UGW) inspection method for long range application, corrosion-related damage detection and tomographic reconstruction algorithms are analysed.

The second chapter of the dissertation is dedicated to the numerical investigation of the UGW propagation in the scaled-down storage tank and transmission through its construction elements, such as shell-to-bottom (T-joint) and lap joint connections, by applying finite element (FE) analysis method. The symmetric S_0 UGW mode propagation through the shell-to-bottom and lap joint connections in the welded plates and their influence on S_0 wave mode transmission losses in the storage tank were analysed. The modelling results were presented.

The third chapter of the dissertation covers the experimental investigation of the symmetric S_0 UGW mode propagation through the lap joint welded plates and verification of the modelling results presented in Section 2. The transmission losses of the symmetric S_0 mode transmitted through the lap joint connection have been estimated and the measurement results are presented.

The fourth chapter of the dissertation is dedicated to the proposed improved transmission tomography reconstruction algorithm for the reconstruction of true values of attenuation. A numerical model of a storage tank floor for the verification

and investigation of the performance of the tomographic reconstruction algorithm is presented.

The fifth chapter of the dissertation presents the experimental investigation results on the UGW propagation in the specially developed 1 m diameter and 6 mm thickness stainless steel circular sample with artificial defects and in the storage tank mock-up scaled-down by 1:8 factor. The reconstructed spatial distribution of the artificial defects and the view of the UGW attenuation distribution in a tank floor reconstructed by using the proposed improved tomographic reconstruction algorithm are presented.

At the end of each chapter, the conclusions are presented.

Each chapter of the dissertation ends with conclusions and the general conclusions of the theoretical and experimental investigations, the list of references and the list of publications on the topic of the dissertation are presented at the end of the dissertation.

CONCLUSIONS

1. The analysis of literature has shown that all previous methods for detecting defects and measuring their parameters inside a storage tank allows to detect the defects only locally and are time-consuming procedures, since they require the tank to be emptied and cleaned before inspection could be performed. The only technique which enables to inspect or at least assess the corrosion level of a tank is the technique based on the application of UGW together with ultrasonic transmission tomography. The analysis has shown that this technique has a potential to obtain the 2D map of general corrosion.
2. The technique based on UGW transmission tomography was developed, enabling to measure the attenuation of guided waves in the storage tank floor and their spatial distribution. The reconstruction of the true values of attenuation was achieved by introducing an additional stage into the reconstruction algorithm based on optimization.
3. The proposed ultrasonic transmission tomography algorithm was verified using the developed tank floor model, which enables to consider the average attenuation in plate, attenuation in the corroded areas and losses on the weld. The results obtained using the developed model demonstrate that the 2% mean relative error of true value of attenuation spatial distribution reconstruction is achievable in plates with no weld. Meanwhile, in the tank floor with welds, the mean relative error increases to 7% in the reconstruction of true value of attenuation. Such increase of relative reconstruction error could be explained by the sharp attenuation profile change at the intersection of corroded areas and welds.

4. The investigation using a 3D model of the scaled-down storage tank has demonstrated that there is no essential increase of losses in the case of UGW propagating under an angle with respect to the weld. However, the angle of the opposite side of the tank at which the guided waves can be received is limited approximately to 180° due to the arrival of stronger waves directly through the tank wall. The simulation results prove that the main propagation losses occur on the welds of tank floor and because of the wave diffraction. In this regard, by considering the real size of the storage tank, the probable propagation distance of UGW is limited to 20–30 m.
5. The finite elements modelling has demonstrated that the transmission losses of the symmetric S_0 wave mode on lap weld vary in the ranges from 1 dB to 8 dB per weld depending on the ratio between the width of the lap joint Δl and wavelength λ . It is very important for practical application that additional bonding caused by corrosion can essentially reduce transmission losses. This explains the difference between the assessed attenuation by modelling and measurements on a real tank carried out during the earlier investigations.
6. The developed ultrasonic transmission tomography technique for measuring the attenuation was verified experimentally. Two types of experimental investigation have been carried out and have shown that:
 - a) the experiments on a specially developed stainless steel circular sample with different artificial defects have demonstrated that in large areas with reduced wall thickness the losses mainly are caused on the boundaries of the zones and this can be observed and estimated in the reconstructed images. The resolution and sensitivity investigation has demonstrated that the defects comparable to the wavelength of incident wave could be observed and their values reconstructed by the proposed method.
 - b) the experiments carried out on the scaled-down storage tank mock-up floor have proven the modelling results and demonstrated similar regularities of wave propagation under the angle with respect to the weld and 180° angular limit for acquisition of tomographic projections. Herewith, the limited number of acquired projections enabled to reconstruct only large areas with higher attenuation which coincide with the cross-section of the welds in the tank floor.

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Audrius Jankauskas was born on 28 June 1986 in Didžiuliai, Raseiniai dist.

Education:

2005 – secondary school, Ariogala secondary school

2009 – bachelor of electronics engineering (electronics engineering study programme), Kaunas University of technology, Faculty of Telecommunications and electronics.

2011 – master of measurement engineering (metrology and measurements study (ultrasonic material characterization specialization) programme), Faculty of Telecommunications and electronics, Kaunas University of technology.

2011–2016 – doctoral student at Prof. K. Baršauskas Ultrasound Research Institute (measurement engineering science 10T), Kaunas University of technology.

Work experience:

2010 – 2013 Engineer, Prof. K. Baršauskas Ultrasound Research Institute, Kaunas University of Technology

2013 – 2014 Project junior researcher, Prof. K. Baršauskas Ultrasound Research Institute, Kaunas University of Technology

2014 – Junior researcher, Prof. K. Baršauskas Ultrasound Research Institute, Kaunas University of Technology

E-mail: audrius.jankauskas@ktu.lt

UDK 620.179.16 + 620.193.92](043.3)

SL344. 2017-06-28, 3,5 leidyb. apsk. I. Tiražas 50 egz.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas