



**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**Algirdas Rainys**

***GAMINIO KOKYBĖS KONTROLĖ TAIKANT  
ULTRAGARSA***

Magistro darbas

Darbo vadovas: doc. A. Povilionis

Šiauliai, 2006

## TURINYS

ĮVADAS .....	3psl.
Defektoskopijos vystymosi istorija ir nedestrukciniai metodai .....	3psl.
Kiti nedestrukciniai metodai .....	5psl.
Ultragarsinio testavimo dabartis ir ateities perspektyva .....	7psl.
ULTRAGARSINIS TESTAVIMAS .....	10psl.
Ultragarsinio testavimo teoriniai pagrindai .....	10psl.
Ultragarsas. Jo fizikiniai pagrindai .....	10psl.
Pagrindiniai medžiagų kontrolės akustiniai metodai .....	22psl.
Ultragarsinio testavimo prietaisai .....	32psl.
Signalų keitikliai .....	36psl.
Pjezoelektriniai signalų keitikliai .....	36psl.
Elektromagnetiniai – akustiniai signalų keitikliai .....	39psl.
Signalų – triukšmo lygis .....	40psl.
Tiriamoji dalis .....	42psl.
Gaminio kontrolės ultragarsu privalumai ir trūkumai .....	49psl.
IŠVADOS .....	51psl.
SUMMARY .....	52psl.
LITERATŪRA .....	53psl.

## IVADAS

Mokslinė ir techninė pažanga vyksta itin sparčiai. Vis didėjančios galimybės bei poreikiai pareikalauja ir atitinkamų didėjančių reikalavimų tiek mašinų, tiek kitų mechanizmų gamyboje ir kontrolėje, ir atskirų jų detalių patikimumui, atsparumui, ilgaamžiškumui ir, be abejonės, kokybei.

Siekiant patenkinti keliamus reikalavimus mašinų ir mechanizmų pramonėje naudojamų medžiagų apdirbimui bei pagamintų gaminių kokybės nustatymui, defektų aptikimui yra kuriami ir naudojami įvairūs nauji medžiagų apdirbimo ir gaminių kontrolės metodai. Kaip teigia vienas iš JAV aviacijos tarpinio priežiūros departamento (AIMD) darbuotojų, vienas iš blogiausių dalykų, kuris gali įvykti aviacijoje, tai kokios nors dalies ar mechanizmo lūžimas skrydžio metu, galintis kainuoti pilotų ir komandos gyvybes. Netgi didžiausia aviacinė katastrofa gali prasidėti nuo mažiausio įtrūkimo ar defekto, susiformavusio struktūros viduje ar lėktuvo įrangoje. Taigi, be tinkamų saugumo, atsargos priemonių, tie maži defektai gali likti nepastebėti iki tol, kol tai jau tampa per vėlu [11].

Tai, be abejonės, yra aktualu ne tik aviacijos srityje, bet ir daug kur kitur, statyboje, pramonėje ir panašiai. Dėl šių priežasčių yra naudojami įvairūs defektų aptikimo metodai, vadinami nedestrukcinio testavimo metodais (NDT). Kai kuriose srityse technikos, mechanizmų tikrinimui yra naudojami netgi keletas metodų, kad būtų galima didelių neigiamų pasekmių tikimybę sumažinti iki didžiausio minimumo. Aviacijoje lėktuvų apžiūra atliekama penkiais skirtingais nedestrukciniais metodais: skysčio matomumo, X-spindulių, magnetinių dalelių, sukūrinės srovės ir ultragarso [11]. Reikia paminėti ir tai, kad vykstanti pažanga įvairiose technikos srityse, vykdomi įvairūs projektai neaplenkia ir defektoskopijos, bei jai keliamų vis didėjančių reikalavimų.

### **Defektoskopijos vystymosi istorija ir nedestrukciniai metodai**

Prasidėjęs instrumentų ir technologijų spartus vystymasis po II Pasaulinio karo paskatino aktyvią nedestrukcinį testavimą praktiką, kuri ir toliau tęsiama bei vystoma. Pirmosiomis dienomis, pirminis nedestrukcinio testavimo taikymo tikslas buvo defektų aptikimas. Tai tapo dalimi "saugaus gyvenimo" kūrimo, siekiant, kad struktūros, mechanizmai neturėtų matomų defektų savo gyvenimo laikotarpyje. Aptikti defektai buvo priežastimi tos detalės, mechanizmo išėmimo iš paslaugų, iš naudojimo. Tokiam poreikiui patenkinti buvo ir tebėra vystomos tokios technikos, kurios naudoja ultragarso bangas, trumpąsias bangas, x-spindulius, dažų prasiskverbimą, magnetinius laukus, ir kitas energijos formas [6].

Be abejo, metodų, skirtų aptikti defektams, pradžia gali būti susieta su atradimu ir išmokimu valdyti bei sukelti tuose metoduose naudojamus reiškinius, kaip x-spinduliai (rentgeno), garsas ir ultragarsas, magnetinis, elektrinis laukas.

*X – spinduliai* (Rentgeno) buvo atrasti 1895 metais, o 1901 metais Rentgenas atrado jų neįprastą panaudojimą, už ką gavo Nobelio premiją fizikos srityje. 1920 metais fizikai pradėjo naudoti magnetiškai indukuotų elektronų akseleratorius (betatronus) kaip mechanizmą intensyvių x spindulių signalo paleidimui, nukreipiant į reikiamą taikinį. Tai sėkmingai pavyko atlikti 1940 metais [10]. Na, o dabar, šių spindulių galimybės yra pritaikomos tiek medicinoje, tiek ir pramonėje ir yra vienas iš defektoskopijos metodų. Nors X spinduliai daugiau žinomi bei taikomi biologijoje, nei kaip nedestrukcinio testavimo metodas medžiagų testavime, tačiau, dėl to, kad turi didelę prasiskverbimo jėgą, jie yra naudingi vertinant beveik visas struktūras. Spinduliai pereina egzempliorių ir yra užfiksuojami kitoje jo pusėje, dažniausiai fotografuojant. Kaip ir biologijoje, padarytas vaizdas rodo tamsesnes ir šviesesnes sritis. Intensyvumo skirtumai atsiranda dėl storio ir tankio skirtumo objekte. Šiuo būdu vidiniai defektai yra lengvai atpažįstami. Akivaizdus šios technikos minusas yra pavojingas radiacijos poveikis biologiniams audiniams. Interpretavimas vaizdo nuotraukos taip pat reikalauja patirties ir įgūdžių [9]. Aviacijoje šis metodas yra taikomas apžiūrai lėktuvo dalių. X spinduliai prasiskverbia pro dalį ir vizualizuoja jos vidų. Taikant matematinės formules tyrėjai tiksliai nustato neatitikimo, nesutapimo vietą. X spinduliai taip pat yra taikomi parašutų dalių apžiūroje juos supakavus, kad įsitikinti, jog viskas yra teisingai sujungta, sudėta [11].

Garsą suprasti ir ištirti siekė žmonės jau nuo neatmenamų laikų. Senovėje garsas žmonėms atrodė kaip nuostabi ir paslaptinga jėga. Jie tikėjo, kad garsas gali pajudinti uolas ir kalnus, iššaukti lietų bei kitus stebuklus atlikti. Tačiau moksliniai eksperimentai su garsu prasidėjo tik XIX amžiuje. 1826 metais viename ežere buvo pirmą kartą išmatuotas garso sklidimo greitis. O dar prieš šį eksperimentą Leonardas da Vinčis buvo išdėstęs savo idėją, kad vandenyje gerai sklinda garsas. 1907 metais Fessendeno generatorius buvo panaudotas garso bangų sukėlimui vandenyje (vėliau šis generatorius buvo gaminamas 540, 1050 ir 3000Hz) [17].

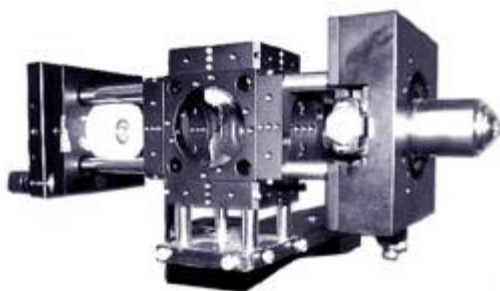
*Ultragarso* studijavimas prasidėjo nuo gyvūnų tyrinėjimo. Tačiau prirėkė daugelio metų, kol negirdimas garsas – ultragarsas – virto dideliu žmogaus pagalbininku. Ultragarsas tapo dideliu pagalbininku daugelyje sričių, bei įtakojė mokslą ir techniką [18]. Prieš II Pasaulinį karą, technikos skirtos garso bangų siuntimui vandeniui ir grįžtančio aido klausymuisi, ar nėra povandeninių laivų, paskatino ankstyvuosius ultragarso tyrėjus praplėsti jo naudojimo sritis ir pritaikyti medicininei diagnostikai, bei toliau tirti jo panaudojimo galimybes. Po II Pasaulinio karo ultragarsas medicinoje pritaikytas daugelyje sričių: tulžies akmenų aptikimui, augliams aptikti ir vizualizuoti, kardiovaskuliariniams tyrimams (kraujo tekėjimo per širdį tyrimams) ir kitur. 1928 metais sovietų

mokslininkas Sokolovas, remdamasis atliktais tyrimais ir bandymais, pasiūlė defektų aptikimui naudoti ultragarsą. Buvo sukurti prietaisai, kurie pavadinti ultragarsiniais defektoskopais [18]. 1929 metais ir 1935 metais Sokolovas tyrė ultragarso naudojimo galimybes metalinių objektų aptikimui. Mulhauser, 1931 metais pradėjo naudoti ultragarsą plyšių kietuosiuose kūnuose aptikimui (naudojosi dviem signalų keitikliais, kad juos aptiktų). Firestone (1940) ir Simons (1945) išvystė pulsuojančio ultragarso testavimą, naudojantis pulsas-aidas technika [6]. Apie 1950 m. be ultragarsinio medžiagų apdirbimo, jau buvo taikomas ir ultragarsinis gaminių kokybės tikrinimo metodas. Šiuo metu, ultragarsinis testavimas mechanikoje yra vienas dažniausiai naudojamų nedestrukcinųjų metodų.

### **Kiti nedestrukciniai metodai.**

*Akustinė emisija.* Daug medžiagų, kai yra tempiamos, spaudžiamos, pradeda skleisti akustines bangas. Jos kyla dėl išsilaisvinusios energijos, atsiradusios deformuojantis ir lūžtant medžiagai. Šios akustinės bangos sklinda medžiaga į jos paviršių, kur yra aptinkamos naudojant aukšto jautrumo pjezoelektrines medžiagas. Šis metodas dažniausiai taikomas tyrinėjant susidėvėjimą ir lūžių atsiradimą [9].

*Elektrinių įtempimų matavimas.* Atliekama elektriniais signalo keitikliais, kurie tiesiogiai kontaktuojami su medžiaga arba yra perkeltami į tam tikrus dominančius taškus. Mechaniniuose testavimuose deformacijų matavimas apkrovos sąlygomis dažniausiai atliekamas naudojant elektrinio įtempimo fiksavimus. Yra sudaroma atitinkama grandinė (pavyzdžiui Wheatstono tiltas), kuri leidžia tiksliai apskaičiuoti įtempimą, įtampos nelaidumo medžiagoje pokyčius. Tačiau dažnai šie metodai suteikia tik apytiksles vertinamo ploto reikšmes. Be to, dažnai yra suabejojama ar pats metodas – įtampos taikymas – nepaveikia matavimų. Ypač tai tampa svarbu mažų egzempliorių testavimuose. Dėl šių priežasčių vis dažniau yra naudojamos nekontaktinės technikos medžiagos charakterizavimui ir struktūros įvertinimui [9].



**1 pav. Optinio nedestrukcinio testavimo prietaisas.**

*Optinis nedestrukcinis testavimas.* Optiniai nedestrukciniai metodai turi didelį jautrumą ir leidžia atlikti pilną tiriamo lauko analizę be jokios būtinybės fizinio kontakto su paviršiumi (pav. 1). Šie metodai kartais gali suteikti daugiau arba skirtingesnės informacijos, ko kitomis technikomis negalima atlikti. Be to, optinės technikos gali būti naudojamos ten, kur kiti metodai negali būti pritaikyti. Taikant šiuos metodus, įtempimo pasiskirstymas, lūžių atsiradimai struktūroje gali būti lengvai pastebimi.

Pagrindiniai optiniai metodai deformacijų matavimui yra:

- fotoelastingumas (galingas metodas, leidžiantis atlikti pilną įtempimo medžiagoje analizę),
- moiré metodai (leidžiantys nustatyti paviršiaus defektus, tačiau reikalaujantys tiesioginio kontakto su paviršiumi),
- holografinė interferencija (fiksuojuama sklindančių nuo paviršiaus bangų amplitudė ir fazės ir lyginamos su atramine banga bei sudaromos hologramos) ir
- taškinės (speckle) technikos (naudojami lazerio spinduliai paviršiaus defektų aptikimui) [9].

*Skysčių matymo (liquid penetrant) metodas.* Taikomas paviršių defektų aptikimui. Yra naudojamas specialus fluorasencinis matomumas ir fluorasencinė šviesa. Tiesiog skystis yra nuvalomas nuo paviršiaus ir užpurškiamas plonas sluoksnis pudros, kuri nusėda tose vietose kur liko skysčio (defekto vietose). Būtent tai padeda pamatyti defektus ultravioletinėje šviesoje. Ryškia žalia šviesą atspindinčios vietos signalizuoja apie galimus defektus: koroziją, trūkį ar bet kokį kitokį metalo defektą [11].

*Magnetinių dalelių metodas.* Yra naudojamos labai mažos geležies dalelės, padengtos fluorasencine medžiaga. Šios dalelės yra paskleidžiamos ant paviršiaus dalies ir paveikiamos magnetinio lauko. Kai magnetinis laukas yra suardomas, dalelės susikaupia tam tikroje vietoje, kur yra trūkis, defektas [11]. Ultravioletinėje šviesoje šios vietos yra aiškiai pastebimos.

Tačiau reikia paminėti, kad 1970 metais atsitiko du įvykiai, kurie paskatino didelius pokyčius. Besitęsiantis technologijų vystymas, ir galimybė aptikti mažus trūkius, ėmė kelti nepasitenkinimą, kad vis daugiau dalių buvo atmetamos, net kai klaidos tikimybė nepasikeitė. Todėl atsirado mechaninių trūkių, lūžių disciplina (drausmė), kuri leido nuspėti, ar tam tikro dydžio lūžis atlaikys tam tikrą apkrovą, smūgį. Buvo atrasti įvairūs dėsniai, kuriais buvo galima prognozuoti trūkių didėjimą ciklinių apkrovų metu. Taigi, atsirado įrankiai, kuriais buvo galima nustatyti struktūros išsilaikymą, net esant tam tikrų dydžių defektams. Tai paskatino naujos filosofijos “saugi klaida” arba “nuostolio tolerancija” atsiradimą. Su šia filosofija keitėsi ir defektų turinčių struktūrų atmetimas. Priimtas sutarimas, kad komponentai, kurie turi žinomus defektus, gali būti toliau naudojami iki tol, kol jie nepadidės iki kritinio lygio, klaidą sukeliančio dydžio. Taip buvo iškeltas naujas iššūkis nedestruktyvių testavimų bendruomenei. Aptikimo nepakanka. Yra reikalinga gauti kiekybinę informaciją apie trūkio dydį, tam kad būtų galima daryti spėjimus apie mechanizmo, komponento naudojimo laiką. Kiekybinis nedestrukcinis vertinimas atsirado kaip nauja atskira disciplina [6]. Taigi, tampa svarbu ne tik aptikti defektus, bet išsiaiškinti, jų charakteristikas.

## Ultragarsinio testavimo dabartis ir ateities perspektyva



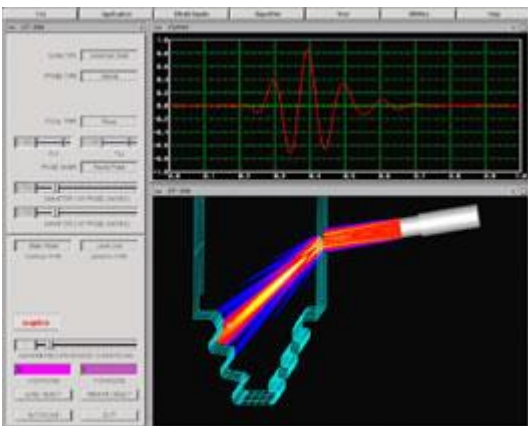
**2 pav. Ultragarsinio testavimo prietaisas.**

Kaip jau prieš tai minėta, ultragarso taikymo galimybės ypač sparčiai pradėjo vystytis po II Pasaulinio karo. Šis būdas yra praktikuojamas jau daugelį metų. Pirmieji ultragarsinio testavimo įrankių sukūrimai prasidėjo nuo 1950 metų ir dar dabar tebevyksta (pav. 2). Nuo 1980 metų pritaikytos kompiuterinės technologijos leidžia technikams toliau vystyti šiuos įrankius, kurti mažesnius, bei su didesnėmis galimybėmis, tikslesniais matavimais [6].



**3 pav. Kompiuterinių technikų pritaikymas ultragarsiniame testavime.**

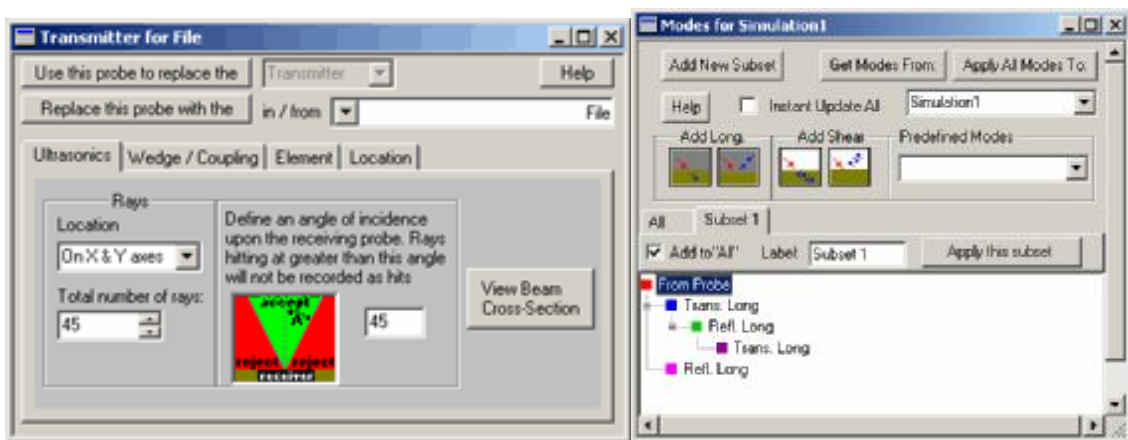
Prietaisai yra tobulinami, jau yra surasti būdai kaip sumažinti operatoriaus (techniko) klaidą fiksuojant duomenis (pats prietaisas užfiksuoja 54000 storio reikšmių, o tada perkelia jas į kompiuterį). Kai kurie metodai turi galimybę užfiksuoti bangų formą bei tiriamo objekto storio reikšmes (storio matavimo prietaisais). Šiuo metu daug dėmesio ir tyrimų yra skiriama supratimui, kaip garsas atsispindi nuo paviršių, turinčių įdubimų, erozinių vietų, kaip būtų galima aptikti vamzdžio vidinių paviršių defektus. Visa tai skatina tikslesnius šio metodo matavimus.



**4 pav. Kompiuterinė programa atkurianti ultragarso lūžimą ir atsispindėjimą.**

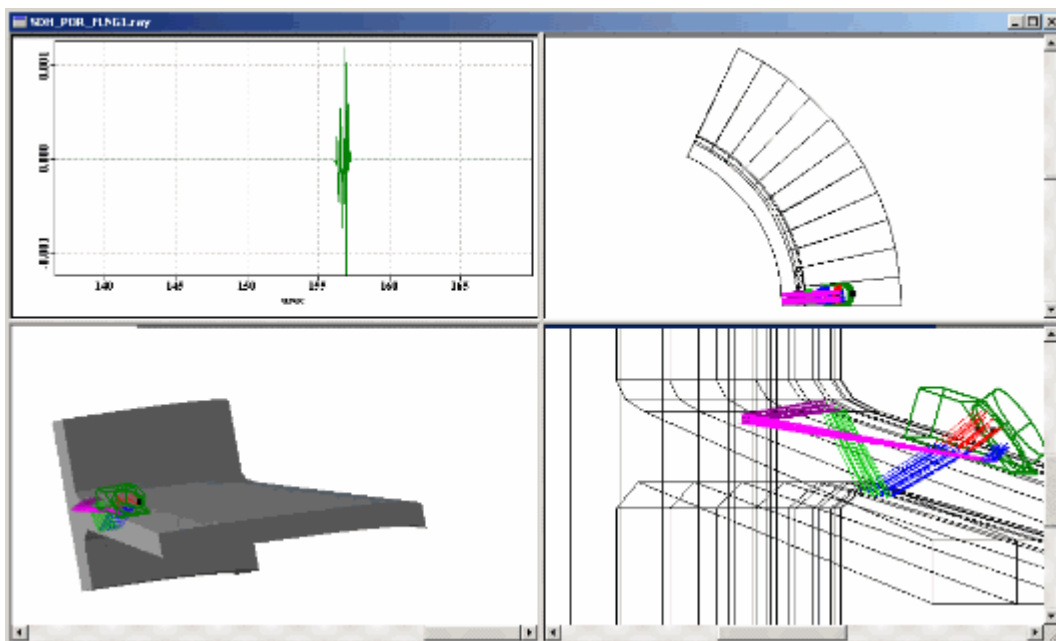
Bandyta į ultragarso prietaisų trūkių detektorius įvesti trigonometrines funkcijas, kurios leistų greičiau ir tiksliau nustatyti trūkius ir jų vietą (taikant skersines bangas). Sukurti signalo keitikliai, kurie leidžia ekrane pavaizduoti ultragarso dažnį, amplitudę, užlaikymą, augimą ir panašiai. Sukurtos automatizuotos sistemos. Taip pat atsirado C skanavimas, kuris pateikia komponento (dalies) planą arba viršutinį vaizdą. Toks skanavimas yra daug greitesnis, negu kontaktinis skanavimas ranka. Tačiau jie turi ir apribojimų dėl komponentų dydžių ir formų bei sistemos kainos [6].

Šiandien kompiuteriai jau gali būti programuojami didelių, sudėtingos formos komponentų testavimui. Prietaisai konstruojami su keliais signalo keitikliais, renkančiais informaciją. Ši informacija yra surenkama, įvertinama kompiuterinėmis programomis ir pateikiama naudotojui (pav. 3). Be to, yra išsaugomas vaizdas, kuris gali būti panaudojamas ateityje. Taip pat reikia paminėti, kad kuriamos įvairios kompiuterinės programos, leidžiančios trimatėje erdvėje pavaizduoti, kaip ultragarso bangos sklinda medžiaga, kaip atsispindi nuo medžiagos paviršiaus arba defekto, patį vaizdą galima sukurti į įvairias puses ir bet kuriuo kampu matyti, kaip sklinda ultragarso bangos (pav. 4). Šios programos vizualizuoja tiek išilgines, tiek skersines bangas, leidžia paaiškinti iš kur atsiranda netikėti aido signalai, padeda pasirinkti tinkamiausią signalo keitiklį ir kita. Pavyzdžiui programa Imagine 3D (UTEX scientific products) (pav. 5) [12].



a)

b)



c)

**5 pav. Kompiuterine programa Imagine 3D atliekamas ultragarso testavimo modeliavimas** (a – signalo keitiklio parametrų pasirinkimas, b – ultragarso bangų, kurios bus generuojamos, tipų pasirinkimas, c – programa tiksliai vaizduoja, kur ir kaip, kiek laiko sklinda ultragarso).



Yra jau sukurtos kiekybinės teorijos, kurios paaiškina trūkių, lūžių sąveiką. Sukurti modeliai, kurie įtraukia rezultatus ir integruoja į kietųjų kūnų modelių geometrinius aprašymus. Yra skaičiuojamos lūžio aptikimo tikimybės. Metalų testavimui yra sukurtos matavimų procedūros. Jau išvystytos aukštos rezoliucijos vaizduojančios sistemos ir įvairių charakteristikų matavimai, kurie leidžia apskaičiuoti ir apibūdinti trūkius, defektus, jų dydį. Šiuo metu yra matuojami net tik defektai, jų dydžiai, kitos charakteristikos, bet ir vertinama, kokios yra medžiagų, kuriose atsirado defektai, charakteristikos [6]. Technologijos nesustojamai vystosi, didėja jų pritaikymo galimybės, galima atlikti vis tikslesnius matavimus. Kas šiandien dar tėra laboratoriniai prietaisai, kaip aukštos rezoliucijos vaizduojančios sistemos, ryt jau gali būti technikų įrankiu.

Savaime kyla klausimas, jei tai jau tiek išstobulintas defektų matavimo metodas, kuriomis kryptimis turėtų toliau būti tobulinamas šis metodas. Tačiau reikia pasakyti, kad žiūrint į ateitį, kur didėja branduolinės jėgos industrija, kur senėja infrastruktūra, nuo kelių, pastatų iki lėktuvų gedimų ir kita, tai yra ir bus susiję su inžinierių ir technikų darbu, yra ir bus aktualu atlikti matavimus ir testavimus. Taip pat ateičiai tampa svarbesni tyrimai produktyvumo gerinimo, defektų atsiradimo išvengimo galimybių ieškojimams. Tačiau defektų identifikavimas ir jų charakterizavimas išlieka labai svarbus ir ateityje bus atliekamas, bei niekada nesustos vystytis. Be abejo, didėjant nedestrukcinėms metodų ir ultragarsinio testavimo pritaikymo galimybėms neišvengiamai turi būti plečiama žinių technikai bazė. Reikia juos supažindinti, bei gerinti supratimą apie garso elgseną įvairiose medžiagose, kurti standartus, kurie pagerintų tarpusavio komunikaciją. Be to, ši tema yra aktuali ir svarbi dėl to, kad ultragarsinio metodo galimybės Lietuvoje yra mažai išnaudojamos.

Šio *darbo tikslas* – išanalizuoti ir pateikti defektų aptikimo ultragarsiniu metodu panaudojimo galimybes, jo privalumus ir trūkumus bei taikymo perspektyvą ateityje.

**Darbo uždaviniai:**

1. išanalizuoti ultragarsinio metodo taikymą defektų aptikimui kietuosiuose kūnuose.
2. apžvelgti metalų kontrolės akustinius metodus ir naudojamus gaminių, detalių kontrolės prietaisus.
3. susisteminti žinias apie ultragarso panaudojimą.

## Ultragarsinis testavimas

Gaminių kokybės matavimuose pirmaujančią vietą, palyginus su kitais nedestrukciniais gaminio kontrolės metodais, užima ultragarsinis metodas. Gaminių kokybės matavimuose pagal statistiką, iki 80% yra naudojami ultragarsiniai kokybės matavimo metodai. Ultragarsinių kokybės matavimo metodų svarbiausias pranašumas - ypač jautrus ir aukštas sudėtingų bei pavojingų defektų suradimo patikimumas. Dėka sukurtų ir kuriamų vis mažesnių, mobilesnių ir patogesnių kokybės ultragarsu matavimo prietaisų, šio metodo aktualumas ir panaudojimo galimybės išliks ir ateityje.

### Ultragarsinio testavimo teoriniai pagrindai

#### *Ultragarsas. Jo fizikiniai pagrindai.*

Žinomų XIX a. fizikų D. Relėjaus, D. Džaulio, P. Kiuri ir kt. atradimai padėjo pagrindus ultragarso panaudojimui įvairiose srityse. XX amžiaus viduryje ultragarsio taikymas defektų aptikimui pralenkė kitus metodus pagal panaudojimo dažnumą.

*Ultragarsas* (ultragarso bangos) – tai elastiniai (mechaniniai virpesiai), kurių dažnis  $f > 20$  kHz. Ultragarso bangų greitis palyginus su elektromagnetinių bangų, yra labai didelis ir stabilus, o vakuume siekia net iki 300 000 km/s.

Visos medžiagos susideda iš atomų, kurie gali būti paskatinti vibraciniam judėjimui apie savo ašį. Daug įvairių vibracinių judėjimų egzistuoja atominiame lygyje, tačiau dauguma yra nesusiję su akustiniu ar ultragarsiniu testavimu. Kai medžiaga nėra gniuždoma ar tempiama virš jos elastingumo charakteristikų, jos atskiros dalelės atlieka lanksčius svyravimus (virpėjimus) [6]. Jei materialioje aplinkoje yra sužadunami ultragarsiniai virpesiai, tai jie sukelia šalia garso šaltinio esančių dalelių periodinius tempimo ir gniuždymo įtempimus. Dėl to materialiosios aplinkos dalelės pradeda virpėti apie pusiausvyros padėtį. Virpančios dalelės virpesius perduoda ir kitoms dalelėms, kurios yra labiau nutolusios nuo garso šaltinio. Taigi, veikiant garso šaltiniui, prasideda tamprūs materialiosios aplinkos dalelių virpesiai. Susiformuoja akustinė (garso) banga. Kadangi materialiosios dalelės virpa apie pusiausvyros padėtį, tai, sklindant akustinei bangai, vyksta tampriosios deformacijos energijos pernešimas. Medžiaga nepernešama, nes pusiausvyros taškai, apie kuriuos svyruoja materialiosios dalelės, yra nejudami. Šie banginiai procesai, pačiu elementariausiu atveju, kai materialiojoje aplinkoje sklinda išilginė plokščioji banga, aprašomi tokia žinoma lygtimi:[7]

$$\frac{\partial^2 e}{\partial t^2} = c \frac{d^2 e}{dx^2}, \quad (1)$$

čia  $\varepsilon$  – virpančios dalelės poslinkis;  $\tau$  – laikas;  $x$  – atstumas nuo virpesių šaltinio;  $c$  – garso greitis materialiojoje aplinkoje.

### Garso greitis.

Žinoma garsas sklinda skirtingu greičiu skirtingose medžiagose. Garso greitis  $c$  yra kiekvienai aplinkai būdingas dydis ir priklauso nuo jos tamprumo ir tankio:[2]

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (2)$$

čia  $E$  – Jungo modulis (tamprumo konstanta);  $\rho$  – aplinkos tankis;

Pavyzdžiai apytikrių išilginių garso bangų greičio medžiagose:

- Aliuminyje - 0.632 cm/mikrosekundė
- 1020 pliene - 0.589 cm/mikrosekundė
- Lydytoje geležyje - 0.480 cm/mikrosekundė.

Pavyzdžiai apytikrių dažnių skersinių garso bangų greičio medžiagose:

- Aliuminyje - 0.313 cm/mikrosekundė
- 1020 pliene - 0.324 cm/mikrosekundė
- Lydytoje geležyje - 0.240 cm/mikrosekundė. [6]

Jei virpesių žadinimo šaltinis sukelia virpesius, kurių amplitudė  $\varepsilon$  ir kampinis dažnis  $\omega$ , tai plokščiosios bangos, sklindančios išilgai  $x$  ašies, lygtis bus

$$x = x_m \sin[\omega(r \pm x/c) + \alpha] \quad (3)$$

čia  $\alpha$  – pradinė fazė, priklausanti nuo koordinatės  $x$  ir laiko  $\tau$  pradžios atskaitos taško,  $\omega$  – kampinis dažnis ( $\omega = 2\pi f$ ) [2]. Nagrinėjant vieną bangą, pradžios atskaitos tašką galima parinkti taip, kad būtų  $\alpha = 0$ . Tada

$$x = x_m \sin \omega(r \pm x/c). \quad (4)$$

### Garso bangos ilgis.

Garso bangos *ilgis* yra svarbi ultragarsinių bangų charakteristika. Bangos ilgis yra tiesiogiai proporcingas bangos greičiui ir netiesiogiai proporcingas virpesių dažniui. Šis santykis matomas formulėje

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \quad (5)$$

čia  $T$  – virpesių periodas;  $c$  – bangos greitis,  $f$  – virpesių dažnis [7].

Ultragarsiniuose testavimuose, trumpesnės bangos, sąlygotos didesnio dažnio, dažniausiai pateikia mažesnių defektų aptikimą. Todėl testavimus atliekantis technikas turi nuspręsti, kokią virpesių dažnį pasirinkti. Bendra taisyklė yra tokia, kad defektas turi būti didesnis nei pusė bangos ilgio, kad būtų aptiktas [6].

### Ultragarso laukas.

Ultragarso *laukas*, t.y. aplinkos dalis, veikiama ultragarso bangų, apibūdinamas virpesių amplitudė  $\varepsilon$ , virpesių greičiu  $v$ , garso slėgiu  $p$ . Jis gali būti aprašytas lygčių sistema:

$$\begin{aligned} n &= \frac{\partial x}{\partial t} = \omega x_m \cos \omega(r - x/c), \\ p &= -S = rc\omega x_m \cos \omega(t - x/c), \end{aligned} \quad (6)$$

čia  $\sigma$  – tamprumo įtempimai ( $\sigma > 0$  – tempimo;  $\sigma < 0$  – gniuždymo)

### Garso slėgis. Banginis pasipriešinimas.

Garso *slėgio* maksimali vertė

$$P_m = rc\omega x_m, \quad (7)$$

čia sandauga  $rc$  yra dydis, apibūdinantis terpės (aplinkos), kurioje sklinda ultragarso bangos, akustines savybes ir dar vadinamas banginiu pasipriešinimu ( $rc$ ). Banginis pasipriešinimas yra svarbus:

1. nustatant akustinį perdavimą (transmisiją) ir atspindėjimą (refleksiją) dviejų medžiagų, turinčių skirtingą banginį pasipriešinimą, susidūrimo (ribinėje) srityje.
2. kuriant ultragarsinius signalų keitiklius.
3. įvertinant garso absorbciją medžiagos viduje [6].

### Ultragarso intensyvumas arba jėga.

Ultragarso virpesių intensyvumas, arba *garso jėga*, gali būti išreiškiamas energija, kuri yra pernešama ultragarso banga per vienetinį plotą, statmeną bangos sklaidimo kryptčiai, per laiko vienetą:

$$I = \frac{1}{2} rc\omega^2 x_m^2,$$

arba

$$I = \frac{P_m^2}{2rc}, \quad (8)$$

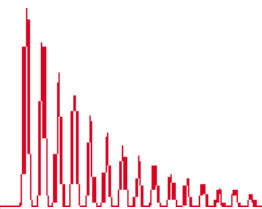
t.y. garso jėga (ultragarsinių virpesių intensyvumas) yra tiesiogiai proporcinga garso slėgio kvadratui ir atvirkščiai proporcinga aplinkos banginiam pasipriešinimui [2].

Paprastai ultragarsinių virpesių intensyvumo skaičiavimų pagal (8) formulę rezultatai yra padidinti, palyginti su eksperimentų duomenimis. Tai paaiškinama tuo, kad garsinis pasipriešinimas  $\rho c$ , paprastai yra kintamas dydis, labai priklausantis nuo ultragarsinio lauko struktūros.

Apibendrinant galima konstatuoti, kad svarbiausios aplinkos, kuria sklinda ultragarsas, ir ultragarso charakteristikos yra garso greitis  $c = \lambda f$ , garso bangos ilgis (arba virpesių dažnis) ir banginis pasipriešinimas  $\rho c$ .

### **Garso bangos silpnėjimas.**

Sklindant garsui realioje tamprioje terpėje, turinčioje tam tikrą pasipriešinimą, patiriami energijos nuostoliai, mažėja garso bangos amplitudė, intensyvumas (pav. 6). Kai garsas sklinda medžiaga, jo intensyvumas mažėja didėjant atstumui. Šis silpnėjimo rezultatas dažniausiai atsiranda dėl dviejų priežasčių: garso bangos sklaidos (išsisklaidymo) ir garso bangos sugėrimo (absorbavimo). Sklaida yra garso atspindėjimas kitomis kryptimis, ne tik originalia sklaidimo kryptimi. Ji atsiranda dėl to, kad kiekvienas realios terpės elementas turi tam tikrą masę ir tamprumą (kitaip šis procesas vadinamas reaktyviuoju tampriosios terpės pasipriešinimu). Absorbavimas yra pakeitimas garso energijos į kitas energijos formas [6]. Kitaip absorbavimo procesas yra vadinamas aktyviuoju tampriosios terpės pasipriešinimu, kuris atsiranda dėl vidinės trinties. Dėl to mechaninė energija yra absorbuojama, išsiskiria tam tikras kiekis šilumos [7,8]. Sujungtas sklaidos ir absorbavimo efektas yra vadinamas silpnėjimu (attenuation).



**6 pav. Ultragarso bangos silpnėjimas.**

Skysčiuose ir dujose ultragarso nuostoliai susidaro dėl vidinės trinties (klampumo) ir šilumos laidumo. Kietuosiuose kūnuose pasireiškia papildomi nuostoliai dėl histerezės ir plastinės deformacijos. Labiausiai ultragarsą sugeria dujos, kiek mažiau – skysčiai, ir dar mažiau – kietieji kūnai. Gerai garsą sugeria įvairios medžiagos (terpės), turinčios mažą tamprumą, pasižyminčios nevienalytiškumu, poringumu ir kt., pvz., plastmasė, guma, pluoštinės medžiagos ir kt. Todėl tokio tipo medžiagos dažniausiai naudojamos garso izoliacijai [7,8].

Sklidamos sugeriančioje terpėje ultragarso bangos, palaipsniui silpsta, t.y. virpesių intensyvumas palaipsniui mažėja pagal eksponentinį dėsnį ir gali būti išreikštas tokiomis lygtimis:

$$x = x_m e^{-ax} \quad \text{ir} \quad (9)$$

čia  $x$  – amplitudė bangos, nukeliavusios atstumą  $x$  nuo pirminės vietos  $x_0$ ,  $x_0$  – bangos, tam tikroje vietoje, amplitudė,  $\alpha$  - silpnėjimo (sugerties) koeficientas,  $e$  – Napier’s konstanta, kuri lygi apytiksliai 2,71828 [6].

$$I = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (10)$$

čia  $I$  – intensyvumas bangos, nukeliavusios atstumą  $x$ ,  $I_0$  – pradinis bangos intensyvumas,  $\alpha$  - silpnėjimo (sugerties) koeficientas,  $e$  – Napier’s konstanta.

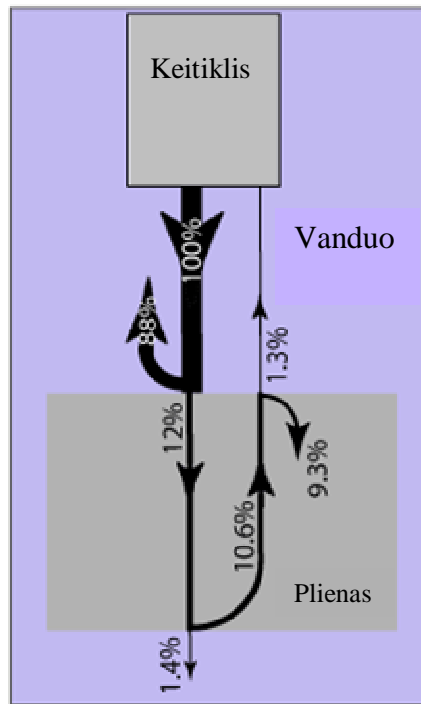
### **Ultragarso atspindėjimas ir absorbavimas.**

Jei sklindančiai ultragarso bangai reikia įveikti ribą tarp dviejų skirtingų terpių, tai dalis bangos energijos atsispindės, o kita dalis pateks į antrąją terpę. Atspindėtos ir į kitą terpę perėjusios energijos santykis priklauso nuo terpių banginių pasipriešinimo dydžių:  $Z_1 = r_1 c_1$  ir  $Z_2 = r_2 c_2$ . Kai  $Z_1 \neq Z_2$  banga iš dalies atsispindi nuo terpių ribos. Atspindėjusios bangos ir visos bangos energijos santykis vadinamas atspindžio koeficientu  $R$  ir išreiškiamas taip:

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2, \quad (11)$$

čia  $R$  – atspindėjimo koeficientas,  $Z_1, Z_2$  - skirtingų terpių banginio pasipriešinimo koeficientai [2, 7].

Kuo didesnis yra neatitikimas tarp medžiagų banginių pasipriešinimų, tuo didesnis energijos procentas yra atspindimas nuo susidūrimo paviršiaus. Atspindėtos energijos ir perduotos energijos kiekių suma turi būti lygi pirminės energijos kiekiui, todėl perduotos energijos koeficientą yra paprasta apskaičiuoti (atimant iš visos energijos atspindėtos energijos dalį). Gautą koeficientą padauginus iš 100, gauname procentinę išraišką [6]. Pavyzdžiui, susijungia dvi medžiagos: vanduo ir plienas. Atspindėtos energijos kiekis yra 88%, o perduodama yra 12% pirminės energijos (pav. 7).



**7 pav. Ultragarso energijos atspindėjimas ir absorbavimas.**

(Pavyzdžiui, turim plieno bloko panardinto vandenyje apžiūrą. Garso energija palieka signalo keitiklį, sklinda vandeniui, pasiekia plieno paviršių. Pasiekusi gaminio paviršių, dalis atspindėtos energijos grįžta (88%). Vandens ir plieno susidūrimo 12% energijos yra perduodama į plieną. Nuo galinio gaminio paviršiaus 88% energijos iš 12%, kuri perėjo susidūrimą, yra atspindima. Tai yra 10.6% pirminės apžiūros bangos energijos. Grįžtant atgal, tik 12% grįžtančios energijos (iš 10.6%) yra perduodama. Taigi, tik 1.3% pirminės energijos yra grąžinama į signalo keitiklį).

Ultragarso bangai pereinant iš skysčio arba kietojo kūno į dujinę terpę arba atvirkščiai,  $R = 1$ , nes dujinės terpės banginio pasipriešinimo koeficientas yra maždaug 100 kartų mažesnis už analogiškus skysčių ir kietųjų kūnų koeficientus. Pvz., pereinant iš vandens į oro terpę  $R = 0,9989$ . Todėl galima tarti, kad ultragarso banga, sklindanti skysčiuose arba kietuosiuose kūnuose, beveik nepereina į greta esančią oro aplinką.

*Stovinčios bangos.* Kai banga atsispindi ties dviejų terpių riba, banginiame lauke gali pasireikšti bangų interferencija, t.y. sklindančią bangą gali užkloti atsispindėjusi banga. Dėl šios dviejų bangų superpozicijos gali susidaryti stovinčioji banga.

Atsispindėjusios bangos fazė priklauso nuo terpių banginio pasipriešinimo koeficientų tarpusavio santykio. Jeigu  $r_1 c_1 < r_2 c_2$ , tai ultragarso banga, sklindanti pirmąja terpe ir pasiekusi antrąją terpę, atsispindės nuo jos ir pakeis fazę 180 laipsnių, nes antroji terpė yra akustikai standesnė (akustinis standumas yra proporcingas banginiam pasipriešinimui). Jeigu  $r_1 c_1 > r_2 c_2$  t.y. terpė, nuo kurios atsispindi banga, yra mažesnio akustinio standumo, tai atsispindėjusios bangos fazė nepasikeis, išliks tokia pat kaip ir buvo.

Plokščiosios minusinės stovinčios bangos lygtis gali būti gauta, sudėjus dvi sklindančias minusines bangas, turinčias vienodą dažnį ir amplitudę. Įvertinę (4), galime parašyti dviejų plokščiųjų bangų, sklindančių priešingomis kryptimis išilgai ašies  $x$ , lygtys:

$$x_1 = x_m \sin w(t + x/c),$$

$$x_2 = x_m \sin w(t - x/c).$$

Sudėję tas lygtis, gausime stovinčios bangos lygtį:

$$x = x_1 + x_2 = 2x_m \cos(wx/c) \sin wt. \quad (12)$$

Iš (12) matyti, kad kiekviename stovinčiosios bangos taške virpesiai yra tokio pat dažnio, kaip ir sklindančių bangų virpesiai. Stovinčios bangos amplitudė priklauso nuo koordinatės  $x$ :

$$x_a = 2x_m \cos wx/c.$$

Atsižvelgę į (5) galutinai gauname:

$$x_a = 2x_m \cos px/l \quad (13)$$

Kaip matyti iš (13), stovinčios bangos amplitudė maksimalias vertes įgauna taškuose, kurių koordinatės

$$x_p = \pm n l / 2, n = 0, 1, 2, \dots \quad (14)$$

Tokie taškai vadinami stovinčiosios bangos pūpsniais. Jie yra nutolę vienas nuo kito per pusę bangos ilgio, ir stovinčiosios bangos amplitudė juose lygi dvigubai sklindančios bangos amplitudei.

Stovinčios bangos amplitudė lygi nuliui tuose taškuose, kurių koordinatės:

$$x_m = \pm (n + 1/2) l / 2, n = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (15)$$

Tokie taškai dar vadinami stovinčiosios bangos mazgais. Kai koordinatė  $x$  yra lygi nelyginiam bangų ketvirtadalių skaičiui, tai  $x_m = 0$ .

Įvertinę (7) galime nustatyti, kad stovinčiosios bangos garso slėgio amplitudė:

$$P_m = 2rcwx_m. \quad (16)$$

Išilginės stovinčiosios bangos poslinkių pūpsniai sutampa su slėgio mazgais ir atvirkščiai, t.y. poslinkių ir slėgių fazės yra perstumtos viena kitos atžvilgiu per ketvirtį bangos ilgio [7].



Sklandančiai bangai atsispindėjus nuo akustiškai minkštos terpės, ribiniame paviršiuje atsiras slėgio mazgas ir atvirkščiai – sklandančiai bangai atsispindėjus nuo akustiškai standžios terpės, ribiniame paviršiuje atsiras slėgio pūpsnis.

Skirtingai nuo sklandančios bangos, stovinčioji banga energijos neperduoda. Energija tik keičia savo formą: kinetinė energija pereina į tampriąją (potencinę) ir atvirkščiai.

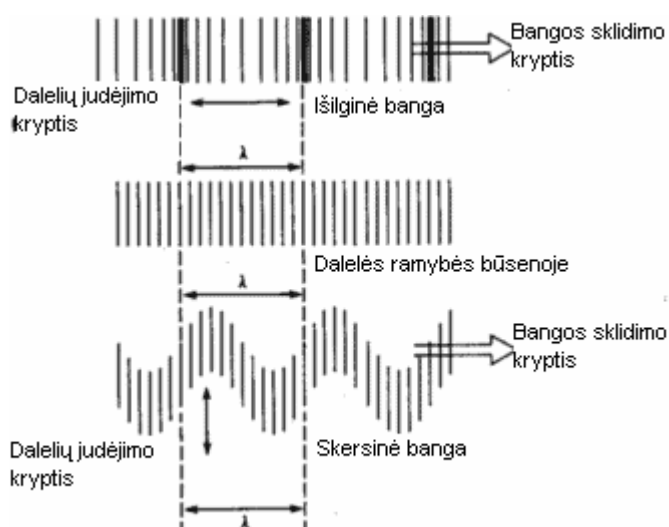
Realiomis sąlygomis, įvairios terpės yra tam tikroje aplinkoje. Todėl stovinčiosios bangos yra slopstančios. Norint gauti neslopstančiąsias stovinčiąsias bangas, energijos nuostolius reikia kompensuoti, pvz. Panaudojant įvairias priverstinio trikdymo jėgas.

Ultragarsinės technologijos dažniausiai naudojamos ribotų matmenų apdirbamoms detalėms, todėl labai dažnai susiduriama su stovinčiosiomis bangomis.

### ***Ultragarso bangų tipai***

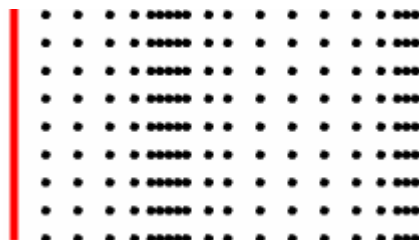
Ultragarso bangos sklinda nuo virpesių šaltinio į visas puses. Greta viena kitos esančios virpančios dalelės virpa ta pačia faze. Taškų, turinčių tą pačią virpesių fazę, visuma vadinama banginiu paviršiumi. Priklausomai nuo banginio paviršiaus formos, yra skiriamos plokščiosios, cilindrinės ir sferinės bangos. Pačiu paprasčiausiu atveju banginis paviršius ir banga vadinama plokščiąja. Virpesių šaltinis šiuo atveju yra plokštuma. Bangos, kurių banginiai paviršiai yra koncentriškų cilindrų arba koncentriškų rutulių formos, vadinamos cilindrinėmis ir sferinėmis bangomis.

Ultragarso bangos dar skirstomos pagal dalelių virpesių kryptį. Išilginės ir skersinės bangos yra du dažniausiai naudojami bangų tipai ultragarsiniuose testavimuose. Dalelių judėjimai yra atsakingi už šių minėtų bangų pasireiškimą (pav. 8).



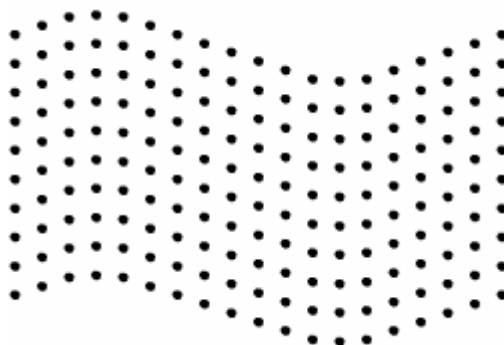
**8 pav. Garso bangų judėjimas.**

Jei dalelių virpesių kryptis sutampa su bangos sklidimo kryptimi, tai tokios bangos vadinamos išilginėmis (pav. 9). Šiose bangose yra aktyvios spaudžiančios ir plečiančios jėgos, todėl kartais šios bangos dar vadinamos spaudimo (pressure) bangomis. Išilginės bangos gali būti sukeltos tiek skysčiuose, tiek ir kietuosiuose kūnuose, nes energija sklinda per atomų struktūrą serijomis spaudžiamųjų ir išretėjančių judėjimų [6].



**9 pav. Išilginės bangos.**

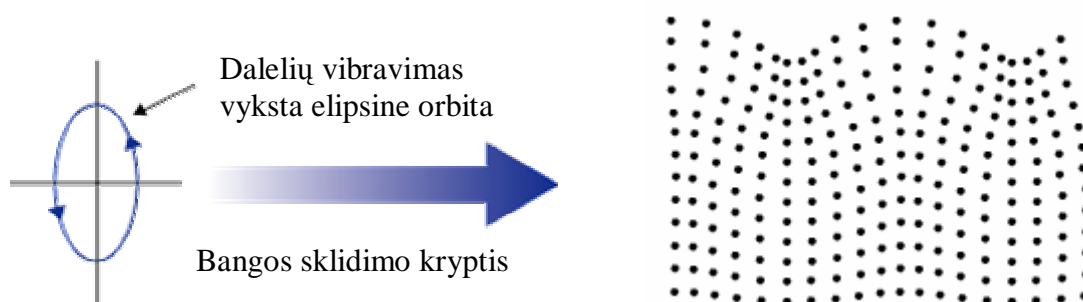
Kai dalelių virpesių kryptis yra statmena bangos sklidimo kryptiai, tokios bangos vadinamos skersinėmis arba transversinėmis (pav. 10). Skersinės bangos reikalauja akustiškai kietojo kūno medžiagos, kad efektyviai pasireikštų, ir netinka naudoti tokioms medžiagoms kaip skysčiai ar dujos. Skersinės bangos yra silpnos, palyginus su išilginėmis. Skersinės bangos dažniausiai yra sukeltos medžiagose panaudojus šiek tiek išilginių bangų energijos [6].



**10 pav. Skersinės bangos.**

Taigi, skysčiuose ir dujose sklinda tik išilginės ultragarsinės bangos, nes šiose terpėse tampriosios deformacijos galimos tik gniuždant. Kietuosiuose kūnuose gali sklisti tiek išilginės, tiek skersinės ultragarsinės bangos, nes šie kūnai pasižymi formos tamprumu, t.y. tampriosios deformacijos kyla ne tik gniuždant, bet ir tempiant bei kitaip deformuojant. Kietuosiuose kūnuose, priklausomai nuo jo formos matmenų, nuo virpesių sužadavimo formos ir kitų faktorių, gali būti sužadintos vienu metu ir išilginės, ir skersinės ultragarso bangos.

Be išilginių ir skersinių bangų, ultragarsiniuose testavimuose kartais taikomos ir kitos bangos. Paviršinės (Rayleigh) bangos dažniausiai sklinda storų kietųjų medžiagų paviršiumi, prasiskverbdamos į vienos bangos ilgio gylį. Dalelės juda elipsine orbita (pav. 11). Šios bangos yra naudojamos paviršiaus defektų aptikimui, nes sklinda paviršiumi ir yra labai jautrios trūkiams, lūžiams.



**11 pav. Paviršinės bangos.**

Plokščiosios bangos gali būti naudojamos tik ploniems metalams. Jos yra kompleksinės vibravimo bangos, kurios sklinda visu medžiagos storu. Šių bangų pasireiškimas priklauso nuo medžiagos lankstumo, tankio, ir kitų medžiaginių savybių dalies (komponento), ir yra labai paveikiamos dažnio bei medžiagos storio (plonumo).

Tačiau, kaip jau minėta, didžiausias dėmesys yra skiriamas išilginėms ir skersinėms bangoms, jos dažniausiai yra naudojamos ultragarsiniuose testavimuose.

Kadangi skysčiuose ir dujose sklinda tik išilginės ultragarsinės bangos, tai tose terpėse garso sklidimo greitis yra lygus išilginės bangos sklidimo greičiui. Kietuosiuose kūnuose gali sklisti tiek išilginės, tiek skersinės ultragarso bangos. Bangų sklidimo greičiai skirtingi:

$$c_{i\grave{s}} = \sqrt{E / \rho}, \quad c_{sk} = \sqrt{G / \rho}, \quad (17)$$

čia E, G – terpės, kuria sklinda ultragarso bangos, tamprumo ir šlyties moduliai;  $\rho$  – terpės tankis; išilginių bangų sklidimo greitis  $c_{i\grave{s}}$  visada yra didesnis už  $c_{sk}$ :  $c_{i\grave{s}} > \sqrt{2} * c_{sk}$  [2,7]. Garso išilginių bangų sklidimo kai kuriose terpėse greičio vertės pateiktos (1) lentelėje.

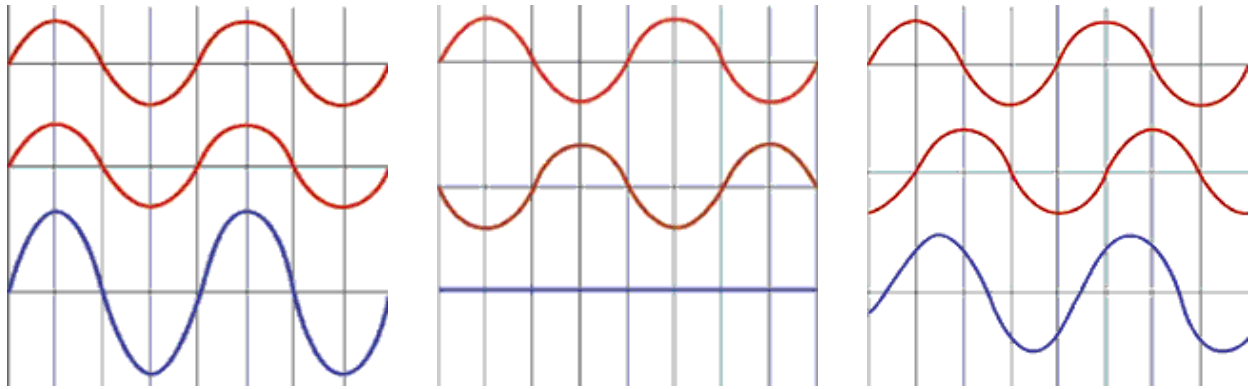
1 lentelė. **Garso išilginių bangų sklidimo įvairiose terpėse greičio vertės.**

Terpė	Garso sklidimo greitis, m/s
Oras	331,5
Vanduo	1490
Plienas	5100 ... 5177
Titanas BR – 1	5072

Kai garsas keliauja kietąja medžiaga, vienos formos energija gali būti pakeista kita. Pavyzdžiui, kai išilginės bangos susiduria su paviršiumi kampu, dalis energijos gali sužadinti dalelių judėjimą kita kryptimi ir taip kyla skersinės bangos. Bangos tipo pakitimas atsiranda kai banga pasiekia dviejų medžiagų, turinčių skirtingą banginį pasipriešinimą, susidūrimą ir įprastas jos sklidimo kampas nėra normalus šiam susidūrimui.

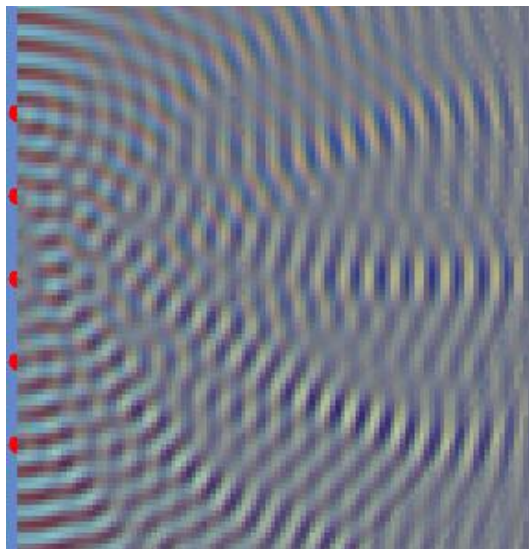
#### ***Bangų sąveika.***

Kai yra paleidžiamos ultragarsinės bangos, jos viena su kita sąveikauja. Ultragariniame testavime bangos yra generuojamos iš keleto šaltinių vienu metu ir taip pat tarpusavyje sąveikauja. Kai bangos sąveikauja, jos pasinaudoja viena kita. Tokiu atveju amplitudė garso spaudimo arba dalelės pajudėjimo iš vietos bet kuriame sąveikos taške yra suma dviejų atskirų bangų amplitudžių. Pirma, tarkim dvi identiškos bangos kyla iš to paties taško. Kai jos yra fazėje (taip, kad viršūnės ir kritimai yra tiksliai vienoje linijoje), jos susijungia (susikombinuoja) ir dalelių pajudėjimas iš pusiausvyros taško padvigubėja, lyginant su jų amplitude, kai sąveikos nėra. Kai jų fazės visiškai neatitinka (taip, kad vienos viršūnė yra kitos kritimas), jos kombinuojasi neutralizuodamos (panaikindamos) viena kitą. Kai dvi bangos nėra vienoje fazėje, bet ir nėra priešingose fazėse, susidaro banga, kurios amplitudė yra suma atskirų bangų amplitudžių visuose susikertančiuose taškuose (pav. 12).



**12 pav. Bangų sąveika** (raudonomis linijomis pavaizduotos pirminės bangos, mėlyna – sąveikos banga).

Kai dviejų sąveikaujančių bangų šaltiniai yra skirtingi, yra daug sudėtingiau pavaizduoti jų sąveiką, bet principas yra tas pats. Kadangi bangos sklinda ratu aplink jį sukėlusį šaltinį, pasklindančios bangos ima sąveikauti tarpusavyje ir kiekviename susidūrimo taške dalelių pajudėjimo iš pusiausvyros taško amplitudė susijungs kaip suma abiejų bangų dalelių judėjimo amplitudžių. Taigi, garso bangos sklinda iš skirtingų signalo keitiklio paviršiaus taškų ir sąveikauja (pav. 13). Kuo arčiau bangų skidimo šaltinio, tuo didesni yra svyravimai arba susikirtimo taškai ir dėl to garso laukas yra labai nelygus. Tai yra žinoma kaip artimoji zona [6]. Tuo tarpu, kuo garso laukas yra toliau nuo signalo keitiklio lauko, kur banga yra paleidžiama, tuo jis tampa vienodesnis.



**13 pav. Garso bangų, sklindančių iš 5 šaltinių sąveika.**

Reikia paminėti, kad garso laukas dar priklauso ir nuo daugelio kitų faktorių: garso dažnio, bangotumo, lauko, kuriame garsas yra sukeltas, garso greičio, kuriuo sklinda banga (šios charakteristikos jau apibūdintos anksčiau).

## ***Pagrindiniai medžiagų kontrolės akustiniai metodai***

Kaip jau minėta, žmogaus akis, nežiūrint į sudėtingą jos sandarą, yra toli nuo idealaus pasaulio ir jo daiktų vertinimo. Žmogus nemato mikroskopinių dalelių, blogai skiria daiktus ir nenustato tiksliai atstumų. Ir, be abejojimo, jam yra neįmanoma pamatyti medžiagų viduje esančių reiškinių, ir defektų. Todėl jis kuria prietaisus, galinčius įveikti šiuos gamtos duotų jutiminių kanalų ribotumus. Viena iš šių grupių ir yra akustiniai metodai. Egzistuoja keletas ultragarsinės defektoskopijos metodų. Šiuos akustinius metodus galima suskirstyti į dvi dideles grupes. Pirmai grupei priskiriami metodai, naudojantys akustinių bangų ir virpesių sklaidimą bei jų priėmimą. Tuo tarpu antros grupės metodai tik tai priima bangas ir virpesius, todėl dar vadinami pasyviaisiais metodais [14].

Kiekvienoje paminėtoje grupėje dar galima visus metodus suskirstyti pagal kontroliuojamuose objektuose sukeliamų stovinčių ar bėgančių bangų požymį.

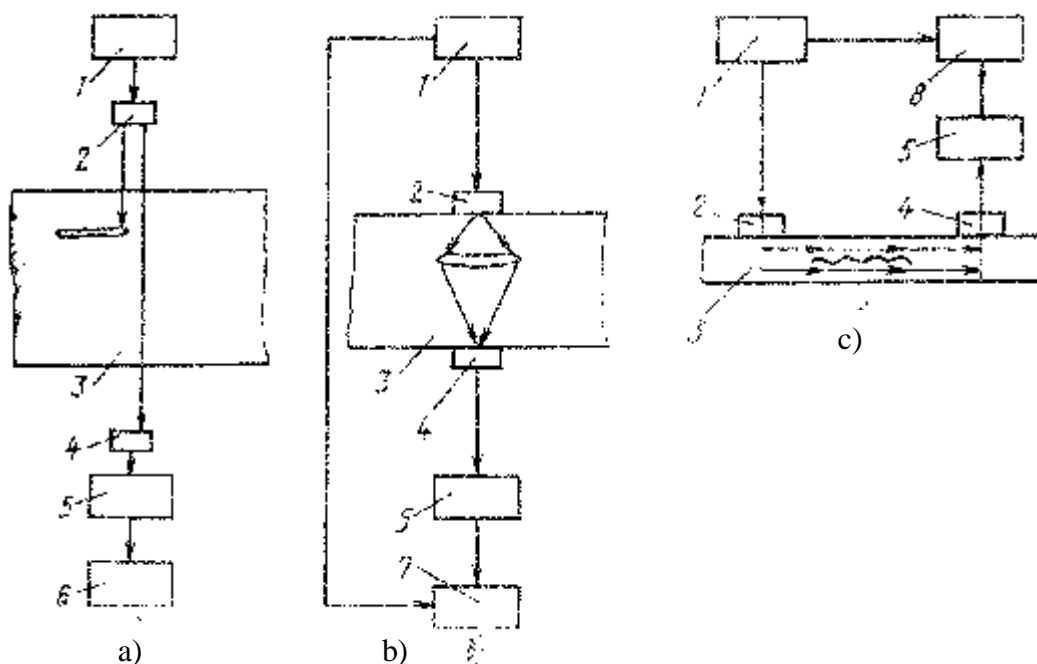
Norint panaudoti vienus ar kitus akustinius metodus gaminių kontrolei, būtina žinoti jų veikimo principus, kad defektų nustatymui būtų galima panaudoti pačius tinkamiausius bei efektyviausius metodus. Todėl toliau pagal pateiktą klasifikaciją bus aptariami akustiniai metodai bei jų panaudojimo galimybės.

Visi aktyvieji akustiniai metodai, veikiantys bėgančių bangų principu, dar skirstomi į tokius pogrupius:

- 1) metodai, naudojantys praeinančias bangas;
- 2) metodai, naudojantys atsispindėjusias bangas;
- 3) kombinuoti metodai, naudojantys bangų praėjimą ir atsispindėjimą [14].

Praeinančias bangas naudojančių metodų panaudojimui reikia dviejų skirtingose kontroliuojamojo gaminio ar jo dalies pusėse išdėstomų signalų keitiklių. Vienas keitiklis skirtas bangų spinduliavimui, o kitas jų priėmimui. Galima naudoti impulsinį arba ištisinį bangų spinduliavimą. Be to, šiam pogrupiui priskiriami ir šie defektoskopiniai metodai:

***Amplitudinis (šešėlinis) metodas.*** Šio metodo pagalba registruojamas gaminio defekto paveiktos kiauvinės bangos amplitudės sumažėjimas. Šešėlinio metodo veikimo principo schema pateikta 14 paveikslo *a* dalyje. Jei gaminyje, detalėje egzistuoja defektas, ultragarsinė banga juda tiesiai, kol nesusiduria su pasipriešinimu. Kuo didesnis yra defektas, tuo reikšmingesnis ultragarso susilpnėjimas. Tačiau šešėlinis metodas yra naudojamas retai dėl mažo jautrumo: aptinkami tik tokie defektai, kurie sukelia nemažesnius kaip 15-20% signalo energijos praradimus. Kitas šio metodo minusas yra tai, kad negalima tiksliai nustatyti, kokiame gylyje yra defektas. Be to, šiuo metodu nėra labai patogu naudotis atliekant testavimą [18].



**14 pav. Objektų kontrolės kiauuriniu metodu schema.** a – šešėlinis; b – laikinis šešėlinis; c – velosimetrinis; (1 – generatorius; 2 – spinduliatorius; 3 – kontrolės objektas; 4 – imtuvas; 5 – stiprintuvas; 6 – amplitudinės matuoklis; 7 – laikmatis; 8 – fazių matuoklis).

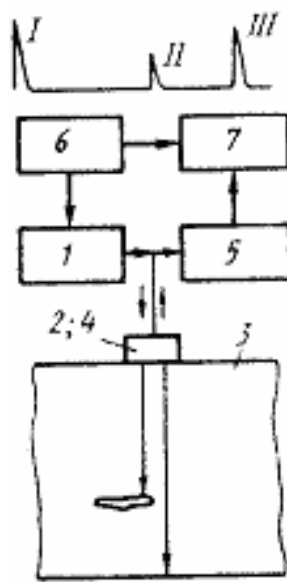
*Laikiniu šešėliniu metodu* galima išmatuoti dėl kontroliuojamajame objekte esančių defektų, impulsų vėlavimą (14 paveikslo *b* dalis).

*Velosimetriniu metodu* analizuojamas kontroliuojamo gaminio defektų kiekio paveiktą stangriųjų bangų greičio pokytis. Jeigu ploname gaminyje paskleidžiamos vingiuotos bangos, tai gaminyje esantis išsisluoksniavimas sumažins jų greitį. Šis bangų greičio sumažėjimas nustatomas pagal praėjusios bangos fazės poslinkį (14 paveikslo *c* dalis).

Metodų, naudojančių atsispindėjusiais bangas, panaudojimui reikia vieno arba dviejų keitiklių. Šių metodų veikimo schema pateikta trečiame paveiksle. Dažniausiai naudojamas impulsinis spinduliavimas. Svarbiausi šio pogrupio metodai yra šie:

*Aido metodas.* Šiuo metodu registruojamas į defektą atsimušęs aido signalas. Tipinė šio metodo sistema susideda iš kelių funkcinų dalių, kaip generatorius/priėmėjas, signalo keitiklis ir parodymų prietaisas. Generatorius/priėmėjas yra elektroninis prietaisas, kuris gali sukelti aukšto voltažo elektrinį virpesį. Sužadintas virpesio, signalo keitiklis sukuria aukšto dažnio ultragarsinę energiją. Garso energija yra paleidžiama ir sklinda medžiaga bangų forma. Jei yra koks nors užsibaigimas (pavyzdžiui trūkis) bangos kelyje, dalis energijos bus atspindėta atgal nuo trūkio paviršiaus. Atspindėtą bangą signalo keitiklis paverčia elektriniu signalu ir tada jis yra

pavaizduojamas parodymų prietaise (ekrane). Pateiktame paveiksle (pav. 15), yra užfiksuojamas atspindėto signalo stiprumas, o ne laikas nuo signalo sukūrimo iki sugrįžusio aido. [3]. Kiti prietaisai fiksuoja signalo laiką. Signalo kelio laikas gali būti tiesiogiai susijęs su atstumu, kuri nuėjo signalas. Yra matuojamas laikas impulso nesucidūrusio su defektu ir susidūrusio su defektu. Jų atėjimo laikas yra proporcingas gaminio storiui ir gyliui iki defekto (1). Iš signalo yra išvedama informacija apie atsispindėjimo dydį, gylį, kryptį ir kitus požymius.



**15 pav. Aido metodo schema.** (1 – generatorius, 2 – spinduliuotuvius, 3 – kontrolės objektas, 4 – imtuvus, 5 – stiprintuvus, 6 – sinchronizatorius, 7 – indikatorius).

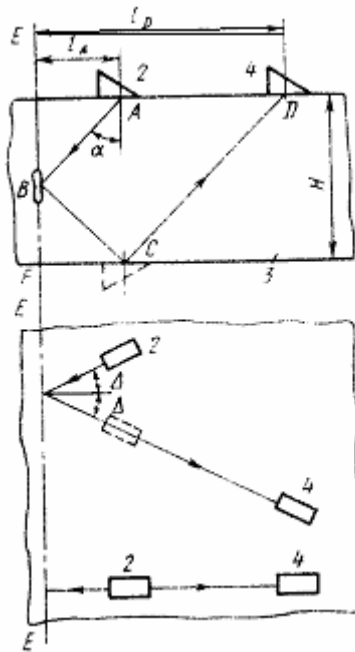
Šis metodas turi privalumų, lyginant su šešėliniais, todėl, kad užtenka priėjimo prie gaminio, detalės iš vienos pusės, nes nereikia priešingoje pusėje prijungti signalų imtuvo. Be to, šio metodo jautrumas yra žymiai didesnis nei šešėlinių [14]. Taikant aido metodą, net vieno procento ultragarso susilpnėjimas bus užfiksuotas. Taip pat šio metodo privalumas, lyginant su šešėliniais, yra galimybė nustatyti defekto gylį, bei dydį, ko negalima padaryti taikant šešėlinius [18].

Be abejonės, šis metodas turi ir keletą trūkumų. Jis nėra tinkamas naudoti labai mažų detalių testavimui. Taip yra dėl to, kad impulsiniai defektoskopai turi vadinamą “mirties zoną” – plotas detalės paviršiuje, kur prietaisas negali aptikti defekto. Taip atsitinka dėl to, kad aido signalo sugrįžimo nuo defekto momentu dar tęsiasi pirminio impulso paleidimas. “Mirties zona” bus mažesnė, kuo bus trumpesnis ultragarso impulsas [18].

**Veidrodiniu aido metodu** analizuojami signalai, veidrodžiškai atsispindėję nuo gaminio dugno ir defekto, t.y. visas bangos praėjimo kelias ABCD (pav. 16). Šiuo metodu surandami vertikalūs plokštumai EF defektai. Šį metodą vadina metodu tandemu, kurio realizavimui keičiant



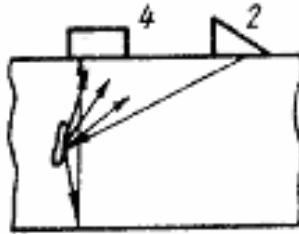
keitiklį 2, 4 palaiko pastovią reikšmę  $l_a + l_d = 2H \operatorname{tg} \alpha$ , o norint gauti veidrodinį atspindį nuo nevertikalių defektų, reikšmė  $l_a + l_d$  yra varijuojama. Vienu iš daugelio veidrodinio aido metodo variantų, galima spinduoį ir imtuvą išdėstyti skirtingose plokštumose, tam, kad būtų galima gauti veidrodinį atspindį nuo vertikalų defektų. Šis variantas vadinamas tandemu – duetu. Naudojant šį variantą, spinduoelis ir imtuvas išdėstomi simetriškai (16 paveiksle parodyta punktyrine linija). Kitas veidrodinis aido metodo variantas leidžia išdėstyti keitiklius skirtingose gaminio pusėse. Toks variantas vadinamas K- metodu [14].



**16 pav. Veidrodinio aido metodo schema.**

(2 – spinduliuotuvus; 4 – imtuvas).

*Delta metodo* pagrindas - dėl gaminio defekto susidarantis bangų lūžimas (pav. 17). Dalis iš spindulio 2 krintančių skersinių bangų nuo defekto veidrodiskai atsispindi, o kita dalis lūžta skersinėmis ir transformuotomis išilginėmis bangomis. Atspindėjimo metu banga taip pat dalinai transformuojasi į išilgines bangas. Lūžusi išilginė banga priimama išilginių bangų imtuvu 4, kuris šiek tiek vėliau taip pat priima ir išilginę bangą, atsispindėjusią nuo apatinio gaminio paviršiaus.



**17 pav. Delta metodo schema.**

(2 – spinduliuotuvius, 4 – imtuvas).

**Reverberacinis metodas** pagrįstas tūrinės reverberacijos kontroliuojamajame objekte laiko analize. Pavyzdžiui, kontroliuojant dvisluoksnes konstrukcijas, su kuriomis kontaktuoja keitiklis, reverberacijos laikas esant kokybiškam sluoksnių sujungimui, viename sluoksnyje yra mažesnis, nes dalis energijos pereina į kitą sluoksnį (pav. 18).

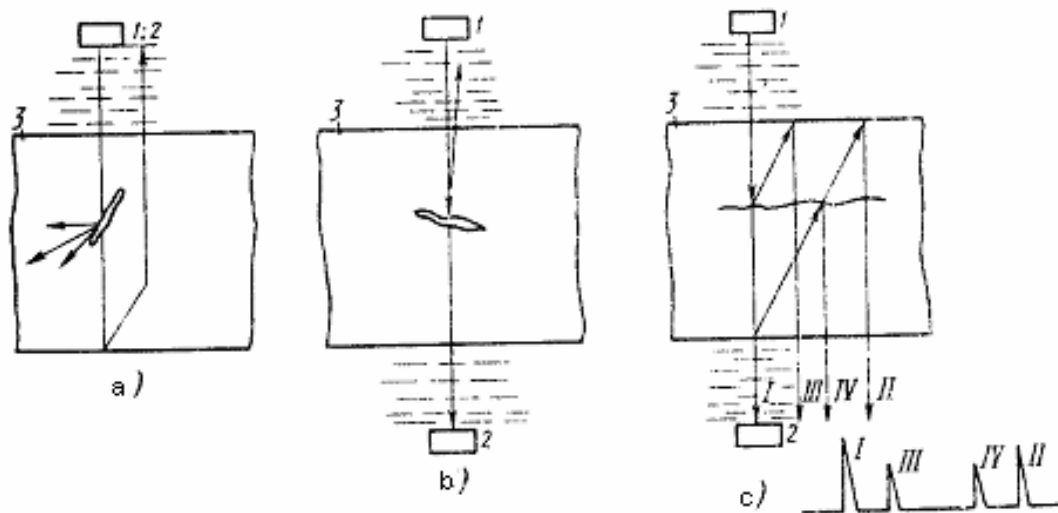


**18 pav. Reverbacinio metodo schema.**

(2 – spinduliuotuvius, 3 – kontrolės objektas, 4 – imtuvas)

Kombinuotuose metoduose naudojami tiek akustinių bangų praėjimo, tiek ir jų atspindėjimo principai. Šių metodų procesai ir ypatybės yra aptariamoms žemiau.

**Veidrodinis šešėlinis metodas** pagrįstas dugninio signalo amplitudės matavimu. 19 paveikslo *a* dalyje atspindėjęs spindulys sąlyginai nukreiptas į šoną. Pagal atlikimo techniką (fiksuojamasis aido signalas) šį metodą galima priskirti atspindžio metodams, o pagal fizikinę kontrolės prasmę (matuojamas gaminio defekto zonoje du kartus praėjusio signalo susilpnėjimas) jis labiau artimas šešėliniams metodams.

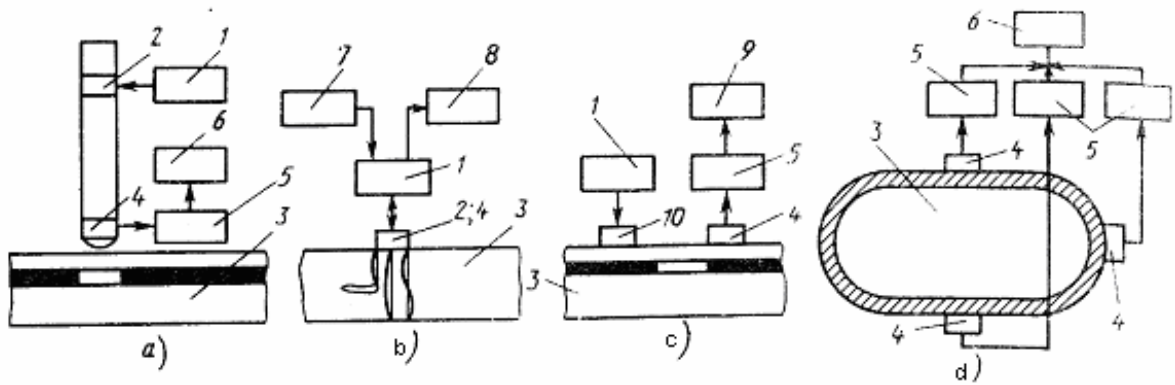


**19 pav. Objektų defektų aptikimo kombinuotais metodais schema.** a – veidrodinis šešėlinis; b – aido šešėlinis; c – aido skvarbusis; (1 – spinduliuotuvius; 2 – imtuvas; 3 – kontrolės objektas).

*Aido šešėlinis* metodas pagrįstas tiek praėjusių, tiek ir atspindėjusių bangų analize (19 paveikslo *b* dalis).

*Aido skvarbiuoju metodu* fiksuojami: skvarbusis signalas I, dukart atspindėtas gaminyje signalas II, o esant gaminyje puskaidriam defektui ir aido skvarbieji signalai III, IV, atitinkantys defekto atspindėtas bangas, einančias nuo gaminio viršutinio ir apatinio paviršiaus. Didelis neskaidrus defektas nustatomas pradingus arba susilpnėjus signalui I, t.y. šešėliniu metodu, o taip pat signalui II. Puskaidriai arba nedideli defektai randami aido metodu - atsiradus signalui III ir IV (19 paveikslo *c* dalis)[14, 16].

*Impedanso metodas* iš esmės skiriasi nuo aptartų metodų. Jis buvo sukurtas sujungimų kokybės tikrinimui. Šis metodas pagrįstas kontroliuojamojo objekto paviršiaus dalies, veikiamos keitiklio, mechaninio arba įėjimo banginio pasipriešinimo kitimo analize. Žemo dažnio impedansiniuose defektoskopuose vietoje keitiklio naudojamas besiremiantis į gaminio paviršių švytuojantis strypas (20 paveikslo *a* dalis). Tarp jų nėra skysčių, todėl būna sausas kontaktas. Jeigu gaminyje yra paviršinių išsisluoksniavimo defektų, tai virš defekto esanti paviršiaus dalis tampa žymiai lankstesnė, t.y. sumažėja jos mechaninis pasipriešinimas (impedansas). Šio veiksmo rezultate keičiasi strypo virpesių režimas, dalinai sumažėja mechaninė įtampa imtuve 4, kuri nurodo galimą defektą. Šio tipo kontrolė gali būti pilnai automatizuota, o duomenys fiksuojami žymint popieriuje elektrinius impulsus.



**20 pav. Objektų kontrolės įvairiais metodais schema.** *a* – impedancinis; *b* – rezonansinis; *c* – akustinis - emisinis; (1 – generatorius; 2 – spinduliuotinis; 3 – kontrolės objektas; 4 – imtuvas; 5 – stiprintuvas; 6 – indikatorius; 7 – dažnio moduliatorius; 8 – rezonanso registratorius; 9 – spektroanalizatorius; 10 – vibratorius).

Aukšto dažnio impedansiniuose (pasipriešinimo) defektoskopuose virpančiu elementu yra įprasto tipo keitiklio pjezo plokštelė. Esant arti gaminio paviršiaus išsisluoksniavimo defektų, keičiasi įėjinis banginis pasipriešinimas *Zak*, o tuo pačiu ir generatoriaus virpesių režimas, liudijantis apie defektų kiekį.

Naudojant stovinčias bangas, sukeliama visame kontroliuojamajame objekte (integraliniai metodai), arba tik jo dalyje (vietiniai metodai) laisvieji arba priverstiniai virpesiai. Laisvieji virpesiai sukeliama trumpalaikiu išoriniu poveikiu į kontroliuojamą objektą, kaip pavyzdžiui, suduodamas smūgis, ko pasekoje vyksta tolesnis laisvas virpėjimas. Norint sukelti priverstinius virpesius, būtinas pastovus kontroliuojamojo objekto kontaktas su virpesius sužadinančiu generatoriumi, kurio dažnis yra pastoviai keičiamas. Informaciniais parametrais čia tampa laisvųjų virpesių dažniai arba priverstinių virpesių rezonansai, kurie dėl sužadinančio generatoriaus įtakos šiek tiek skiriasi. Šie dažniai priklausomi nuo gaminio geometrinių parametrų, jame sklindančio ultragarso greičio [14, 19].

**Vietinių laisvųjų virpesių metodų** schema pateikta 20 paveikslo *c* dalyje. Šis metodas yra vienas iš seniausių defektoskopijos metodų. Juo seniai naudojama tikrinant stiklą, keramiką, kristalus. Vibratoriaus plaktuko 10 pagalba kontroliuojamo gaminio dalyje sukeliama virpesiai ir spektro analizatoriumi 9 analizuojamas priverstinių dažnių spektras. Defektiniuose gaminiuose spektras dažniausiai būna nukrypęs į aukštų dažnių pusę.

Vietiniai priverstinių bangų metodai arba **rezonansiniai metodai**. Pjezo keitiklio pagalba gaminio sienelėje sužadina ultragarsinės bangos (20 paveikslo *b* dalis). Virpesių dažnis yra moduluojamas; fiksuojami dažniai, kuriuose sužadina virpesių rezonansai. Pagal rezonansų dažnį nustatomas gaminio sienelės storis ir defektų kiekis. Paraleliniai gaminio paviršiui defektai

iššaukia matuojamos sienelės storio nukrypimus, o defektai, esantys netoli paviršiaus ir išsidėstę kampuose – rezonansinių reiškinių išnykimą. Šis metodas yra naudojamas ne tik kontrolei suvirintų siūlių, bet ir paviršiaus korozijos lygio nustatymui. Ypač tiksliai vamzdžių sienelių storio išmatavimui taip pat naudojamas vietinis laisvųjų virpesių metodas. Rezonansinis metodas ypatingai patogus povandeninės laivo dalies apžiūrai, nes nereikia iškelti laivo [18]. Taip pat šis metodas sėkmingai susidoroja su kontrolės vaidmeniu statybinių medžiagų pramonėje. Rezonansinis ultragarsinės defektoskopijos metodas pateisino save ne tik jo kūrime, bet ir išsprendime kai kurių teorinių problemų. Tyrimai parodė, kad šį kontrolės metodą galima naudoti kietųjų kūnų charakteristikų testavimuose aukštos temperatūros sąlygomis, o tai padeda pasirinkti optimaliausią technologinį lygį (pavyzdžiui, deginimui statybinių medžiagų) [18].

**Akustinis topografinis metodas** yra priskiriamas priverstinių virpesių metodams. Šis metodas pagrįstas kontroliuojamo objekto paviršiuje susidariusių, ant paviršiaus užneštų miltelių pagalba, stangrių virpesių amplitudės pasiskirstymo registravimu. Defektuotoje gaminio dalyje nusėda mažesnis miltelių kiekis, kurį galima paaiškinti virpesių amplitudės padidėjimu. Šis padidėjimas pasireiškia dėl vykstančių rezonansinių reiškinių gaminyje.

**Akustinis – emisinis metodas** priklausi pasyviems akustiniams kontrolės metodams. Jame yra panaudojamos bėgančios bangos (20 paveikslo *d* dalis). Šis metodas pagrįstas stangrių bangų akustinės emisijos, vykstančios dėl vietinių kontroliuojamo objekto dinaminių pokyčių, parametru analize. Tokie reiškiniai, kaip plyšių atsiradimas ir didėjimas, alotropinis virsmas yra vieni iš labiausiai charakteringų akustinių bangų emisijos šaltinių. Kontaktuojantys su gaminiu stangriųjų bangų priėmimo keitikliai leidžia nustatyti emisijos šaltinių kiekį, o pagal gautus į skirtingus keitiklio signalus galima nustatyti ir pačio emisijos šaltinio vietą.

Stovinčių bangų ar virpesių sužadinimas kontroliuojamame objekte sudaro pagrindą pasyviems akustiniams metodams. Jiems priskiriami yra **vibraciniai – diagnostiniai** ir **triukšmo – diagnostiniai** metodai. Vibraciniu – diagnostiniu metodu kontaktinio tipo imtuvo pagalba analizuojami atskiros gaminio dalies ar mazgo vibracijos parametrai. Antruoju metodu, klausos arba mikrofoninio imtuvo pagalba, studijuojamas dirbančiųjų mechanizmų triukšmų spektras.

Pagal dažnio požymį visi aptarti akustiniai metodai skirstomi į žemo dažnio ir aukšto dažnio. Pirmiesiems priskiriami virpesiai iki keleto dešimčių kHz ultragarso dažnių diapazone, o antriesiems – nuo keleto šimtų iki 50 MHz ultragarso dažnių diapazone. Aukšto dažnio metodai dažniausiai vadinami ultragarsiniais. Metalų testavimuose pirmenybė teikiama aukšto dažnio metodams.

Iš visų aukščiau aptartų metodų, dažniausiai praktikoje yra panaudojamas aido metodas. Šio metodo pagalba patikrinama daugiau kaip 90 procentų visų objektų. Panaudojant įvairių tipų bangas, šio metodo pagalba galima tikrinti pakuotes, liejinius, suvirinimo siūles bei daugelį

nemetalinių medžiagų. Aido metodas dar naudojamas gaminių geometrinių matmenų matavimui. Fiksuojant dugninio signalo atėjimo laiką ir žinant ultragarso sklidimo medžiagoje greitį, galima nustatyti gaminio storį ir esant priėjimui tik iš vienos gaminio pusės. Jeigu gaminio storis žinomas, tai pagal dugninį signalą galima išmatuoti jo greitį ir pagal ultragarso signalo slopimą nustatyti medžiagos fizines-mechanines savybes.

Šešėlinio ir aido skvarbiojo metodo panaudojimas kontrolei yra galimas, tik esant priėjimui iš abiejų gaminio pusių. Šie metodai naudojami paprastos formos gaminių automatinei kontrolei imersiniame variante (13 paveikslo a ir 19 paveikslo c dalis). Šešėliniu metodu, dėl didelės trukdžių įtakos, surandami žymiai didesni defektai, kaip aido ar aido skvarbiuoju metodu.

Šešėlinis metodas naudojamas gaminių, turinčių aukštą struktūrinės reverberacijos lygį, kontrolei. Kiaurinis signalas į imtuvą patenka anksčiau negu struktūrinės reverberacijos, kas leidžia jį užregistruoti trukdžių fone. Kontroliuojant plonus gaminius su ypač aukštu struktūrinių trikdžių laipsniu, maži defektai nustatomi laikiniu – šešėliniu metodu. Šešėlinis ir laikinis–šešėlinis metodai leidžia aptikti didelius defektus tose medžiagose, kuriose negalima panaudoti kitų akustinių metodų, kaip pavyzdžiui, žaliaviniame ketuje, stambiagrūdiniame pliene [14, 15].

Veidrodinį šešėlinį metodą galima panaudoti kartu su aido metodu arba kaip jo papildymą tais atvejais, kai nustatomas defektas silpnai atspindi ultragarsines bangas (19 paveikslo a dalis). Defektai, statmeni gaminio paviršiui, kuriuo juda keitiklis, pavyzdžiui, plyšiai, duoda labai silpną pasklidusį signalą, todėl jie aido metodu negali būti nustatyti. Tačiau tuo pačiu metu jie susilpnina dugninį signalą, ko pasėkoje jų paviršiuje išilginė banga transformuojasi į tekančią. O ši, savo ruožtu, išspinduliuoja nešančias energiją šonines bangas [14].

Veidrodinis šešėlinis metodas, pavyzdžiui, gali būti panaudojamas bėgių kontrolei, siekiant nustatyti ar nėra vertikalių įtrūkimų jų kakleliuose. Šiuo metodu nustatomi didesni defektai, kaip aido metodu. Tačiau aido metodo pranašumas prieš veidrodinį šešėlinį yra tas, kad jį galima naudoti ir esant vienapusiai priėjimui prie kontroliuojamo gaminio paviršiaus.

Veidrodinis aido metodas taip pat naudojamas statmenų įvado paviršiui defektų nustatymui. Juo galima nustatyti žymiai smulkesnius defektus, kaip veidrodiniu šešėliniu metodu, tačiau tam būtinas defektų zonoje pakankamai didelis lygaus paviršiaus plotas (16 paveikslas). Bėgių kontrolei šio metodo, dėl per mažo lygaus ploto, panaudoti negalima, todėl jų kokybė kontroliuojama tik veidrodiniu šešėliniu metodu. Defektą D galima aptikti suderintu nuožulniu keitikliu, esančiu A taške. Tačiau šiuo atveju veidrodiskai atsispindėjusi banga nukrypsta į šoną ir į keitiklį patenka tik silpnas pasklidęs signalas. Tačiau keitikliai, esantys C ir D taškuose, aukštesniu jautrumu atranda gaminio defektus.

Kaip tandemas, vertikalūs ir aido metodai yra panaudojami ieškant suvirinimo sujungimuose vertikalių plyšių ir nesuvirinimo defektų. Kai kurių suvirinimo rūšių, pavyzdžiui

kaip elektroninio-spindulinio virinimo, nesuvirinta vieta turės lygų atspindintį paviršių, kuris silpnai skleis ultragarsines bangas. Todėl tokius defektus yra geriau nustatinėti veidrodiniu aido metodu. Apvalių formų defektai (kaip šlako intarpai, poros) skleidžia stiprų pasklidą signalą, lengvai registruojamą A taške esančiu suderintu keitikliu, kai tuo pačiu einantis nuo jų veidrodis atspindys yra labai silpnas. Lyginant A ir D taškuose atsispindėjusius signalus, galima nustatyti suvirinimo jungtyje esančio defekto formą.

Variantas tandemas - duetas panaudojamas tais atvejais, kai yra sudėtinga išdėstyti keitiklius vienoje plokštumoje. Todėl šis metodas naudojamas skersinių plyšių nustatymui suvirinimo siūlėse. Šiuo atveju keitikliai yra išdėstomi skirtingose siūlės iškilumų pusėse. Kampai  $s_1$  ir  $s_2$  parenkami arba labai maži – iki 10 laipsnių, arba dideli – daugiau kaip 35 laipsnius, kad skersinės bangos netransformuotųsi į išilgines. Esant nedidesniam kaip 10 laipsnių kampui, transformacija maža, o esant kampui lygiam 35 laipsniams ir didesniam, dėl trečio kritinio kampo įtakos, transformacija taip pat negalima [14, 19].

Suvirinimo sujungimų kontrolės metu, siekiant gauti papildomos informacijos apie defektus, yra panaudojamas ir delta metodas. 17 paveiksle parodyta, kaip spinduliuojamos skersinės bangos, o priimamos išilginės bangos. Efektyvi skersinių bangų transformacija defekte į išilgines bangas vyksta tada, kai kritimo kampas ant plokščio defekto yra mažesnis už trečiąjį kritinį kampą arba jei defekto spinduliavimo įtakoje atsiranda išilginė banga. Šio metodo pagalba galima gana tiksliai nustatyti išilgai suvirinimo siūlės esančio defekto padėtį, kas labai svarbu esant automatiniam jo registravimui.

Aido šešėlinis metodas taip pat naudojamas suvirinimo junginių kontrolei. Esant automatinei kontrolei, išdėstyti abiejose siūlės pusėse keitikliai priima tiek atsispindėjusius, tiek ir praėjusius signalus. Pastarieji naudojami akustinio kontakto kokybės kontrolei ir defektų suradimui, orientuojantis, kad aido signalai nuo jų yra labai silpni.

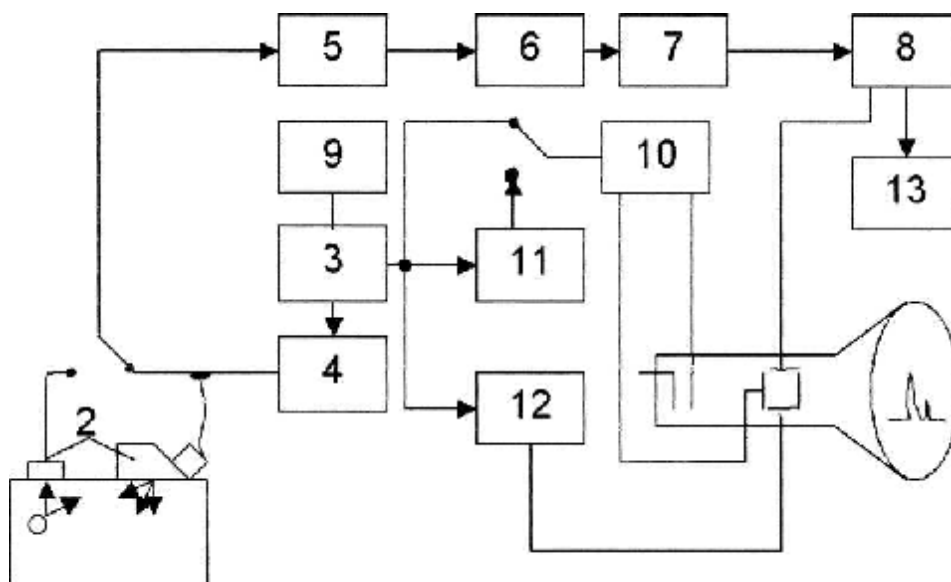
Vietinių priverstinių virpesių metodas naudojamas nedidelių plokščių matavimui ir esant vienapusiam priėjimui prie gaminio. Automatiniam vamzdžių sienelių storio matavimui yra panaudojami imperiniai rezonansiniai storio matuokliai. Vietinių laisvųjų virpesių metodas taip pat yra panaudojamas plokščio matavimams.

Integralinis priverstinių virpesių metodas naudojamas paprastų ir nedidelių formų gaminių kokybės tikrinimui. Defektai ar medžiagos savybių pakitimai fiksuojami pagal rezonansinių dažnių spektro pakitimus.

Reverberacinis, impedansinis, velosimetrinis, akustinis-topografinis metodai ir vietinių laisvųjų virpesių metodas šiuo metu dažniausiai naudojami nemetalinių medžiagų kontrolei [14, 19].

## Ultragarsinio testavimo prietaisai

Ultragarsas plačiai taikomas gana įvairiuose matavimo - kontrolės prietaisuose, skirtuose defektams nustatyti. Vienas iš plačiai naudojamų prietaisų yra *ultragarsinis defektoskopas* (pav. 21). Ultragarsinis defektoskopas skirtas defektams (nelygumams, plyšiams, įtrūkimams) ir medžiagos nevienalytiškumui detalėse nustatyti. Defektoskopai būna dvejų tipų: specialūs ir bendros paskirties. Bendros paskirties defektoskopai yra tie, kuriems nepriskirtas konkretus kontrolės objektas, specialūs defektoskopai - kuriems nustatytas tam tikras kontroliuojamų gaminių tipas. Abiejuose tipuose defektų koordinatėms, matmenims ir kitoms charakteristikoms nustatyti yra naudojamas ultragarsinių svyravimų impulsų generavimas, jų priėmimas ir nuo defektnių zonų atsispindėjusio signalo registravimas. [15,16]



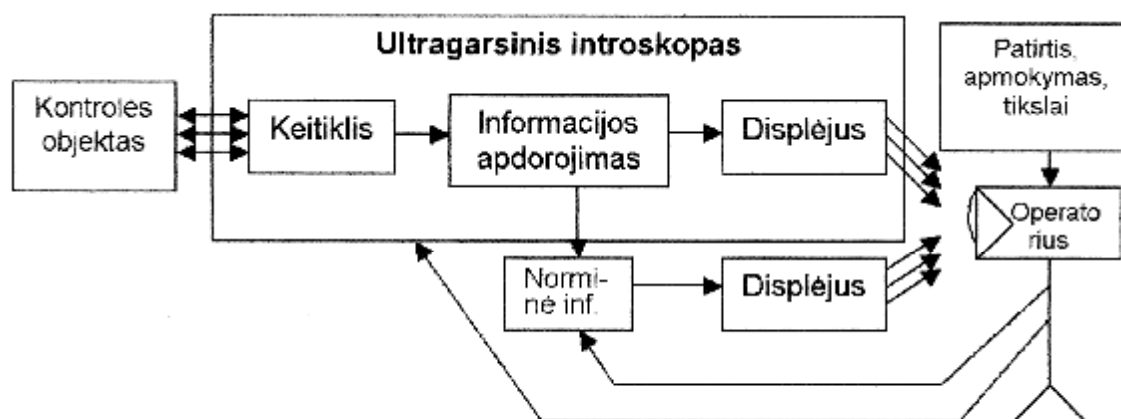
**21 pav. Ultragarsinio defektoskopo struktūrinė schema.** (1 – testuojamas objektas, 2 – signalo keitiklis, 4 – impulsų generatorius, 5 – kalibruojantis atenuatorius, 6 – dažnio stiprintuvas, 7 – detektorius, 8 – vaizdo stiprintuvas, 9 – įtampos blokas, 10 – įtampos generatorius, 11 – užlaikymo generatorius, 12 – gylis matuoklis, 13 – ekranas).

Kaip šis prietaisas veikia? Defektoskopo veikimo principą galima aprašyti taip: signalo keitiklis 2 keičia elektrinius virpesius ultragarsiniais, generuoja ultragarsinį lauką medžiagoje 1 ir priima grįžtamuosius atspindžio signalus nuo medžiagos defektnių zonų. Zonduojančių impulsų generatorius 4 generuoja aukšto dažnio elektrinius impulsus, sužadinančius keitiklį, kuris ir paleidžia ultragarsinę bangą. Priėmimo - stiprinimo prietaiso dalis susideda iš aukšto dažnio stiprintuvo 6, detektoriaus 7 ir vaizdo stiprintuvo 8. Aukšto dažnio stiprintuvo stiprinimo koeficientas valdomas laike įtampa, paduodama iš bloko 9. Stiprintuvo įėjime jungiasi kalibruojantis



atenuatorius 5 (atsispindėjusių signalų amplitudei matuoti). Detektorius arba vaizdo stiprintuvas paprastai slopina mažų amplitudžių signalus ir trukdžius, nepraleisdamas jų į defektoskopo išėjimą. Detektoriaus signalams išvesti naudojamas ekranas 13. Nukreipimo generatorius 10 formuoja įtampą spinduliui nukreipti ekrane 13. Įtampos generatorius 10 pasileidžia impulsu iš užlaikymo generatoriaus 11. Gylio matuoklis 12 skirtas defekto koordinatėms nustatyti impulso praėjimo iki defekto ir atgal laiko matavimo būdu. Automatinis defektų signalizatorius skirtas garsiniam arba šviesos signalui formuoti, kai vienu metu į sutapimo bloką patenka selektyvusis ir vaizdo signalas. Tai leidžia operatoriui ne visą laiką žiūrėti į ekraną laukiant, kol pasikeis rodmenys.

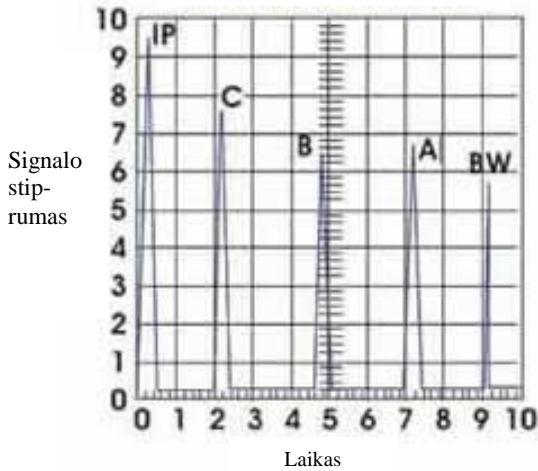
Defektams aptikti taip pat plačiai naudojamas *ultragarsinis introskopas* (pav. 22). Introskopas nuo defektoskopo skiriasi tuo, kad defektoskopo keitiklis stovi vietoje, o introskopo yra slankiojamas medžiagos paviršiumi. Ultragarsinis introskopas keičia akustinių signalų lauką išraiška, priimama operatoriaus. [15,16]



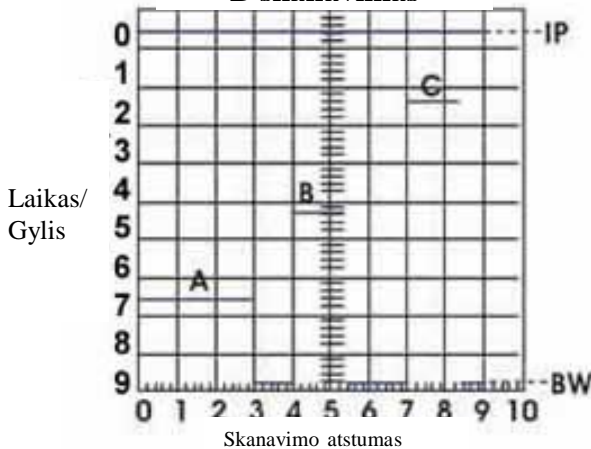
**22 pav. Ultragarsinio introskopo funkcinė schema.**

Ultragarsiniu introskopu skenuojant medžiagą yra nustatomi jos defektai. Skiriami trys skanavimo būdai [6]:

### A skanavimas



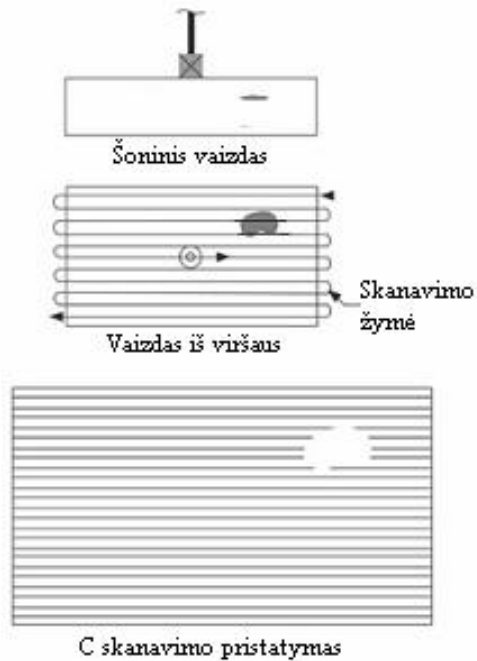
### B skanavimas



### 23 pav. A ir B skanavimų duomenų pristatymas.

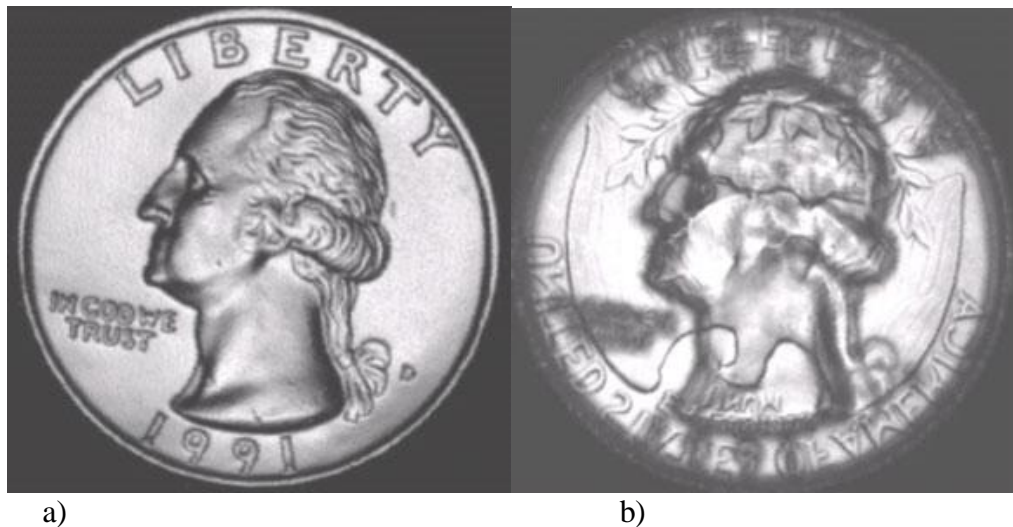
vaizdas testuojamos detalės galinės sienelės (BW), susiaurėjimo vietos (A) ir defektų vietos (B ir C). Šio būdo ribotumas – tai, kad didesni defektai, esantys arčiau paviršiaus, gali uždengti mažesnius, gilesnius defektus.

- *A skanavimas* - informacijos gavimas iš nejudančio keitiklio, t.y. defektoskopija. Šio skanavimo tipo atveju yra užfiksuojamas grįžtančios energijos kiekis, kaip laiko funkcija. Dviejų ašių sistemoje yra pažymimas grįžusios energijos kiekis ir laikas, per kurį garsas sklido medžiaga (pav. 23). Paveiksle 23 a dalyje yra pavaizduotas A-skanavimas. Pirminis signalas, kuris buvo generuotas keitiklio, pavaizduotas *IP* signalu, kuris yra arti nulio laiko atžvilgiu. Kai garso banga pasiekia galinę sienelę yra daug vėliau užfiksuojamas grįžantis signalas *BW*, rodydamas, kad sklido didesnę atstumą, kol pasiekė paviršių. Signalas *A* – garso energija, atsispindėjusi nuo paviršiaus (mažesnio storio vietoje). Signalai *B* ir *C* – atsispindėjusi garso energija nuo trūkio vietų. Energijos kiekis ir laikas leidžia įvertinti, kokioje vietoje yra defektai.
- *B skanavimas* - informacijos gavimas iš perslenkamo viena kryptim keitiklio signalų (23 paveikslo b dalis). Parodymų prietaisuose yra fiksuojamas signalo laikas, signalo keitiklio vieta (pozicija). Pagal šiuos kriterijus yra nustatomos defektų vietos. Ekране pateikiamas
- *C skanavimas* - informacijos gavimas vedžiojant keitiklį objekto paviršiumi taip, kad pėdsakas formuotų rastrą (pav. 24). Galimi kelių skanavimo būdų jungimo deriniai. Šis skanavimo būdas sukuria plano tipo vaizdą testuojamo objekto vietos ir dydžio. Vaizdo planas yra paralelinis keitiklio skanavimo procesui. Šio skanavimo duomenys yra automatiškai apdorojami, naudojantis kompiuterio kontroliuojama panardinto skanavimo sistema. Tipiškai duomenys yra surenkami kaip A skanavime ir signalo amplitudė bei signalo laikas yra užrašomi pastoviais intervalais testuojamos dalies skanavimo metu.



**24 pav. C skanavimas ir duomenų pristatymas.**

Aukštos rezoliucijos skanavimas gali sukurti labai detalų vaizdą [6]. Kaip pavyzdys yra pateikiamas monetos skanavimas (pav. 25). Šviesesnės vietos rodo vietas, nuo kurių didelis kiekis energijos yra atspindimas atgal į signalų keitiklį. Šis skanavimas taip pat užfiksuoja grįžtančios nuo galinės sienelės energijos kiekį. Vaizde yra matomas monetos galinis vaizdas, nors viršutinis vaizdas jį uždengia, nes energija grįžta per viršutinį monetos paviršių.



**25 pav. Monetos skanavimas aukštos rezoliucijos prietaisu.** (a – tikros monetos vienos pusės nuotrauka, b – tos pačios monetos vaizdas, gautas ultragarsiniu skanavimu; matomas tiek viršutinis monetos reljefas, tiek apatinis)

Ultragarsiniuose introskopuose dažniausiai atliekamas B skanavimas. Ultragarsiniai introskopai naudojami medžiagų, pavyzdžiui, gumos, plastmasės kontrolei. Taip pat gaminami introskopai metalinių detalių suvirinimų kontrolei ir detalių storiui matuoti [15].

Jautrumas ir rezoliucija yra du terminai, naudojami apibūdinant ultragarsinių testavimų prietaisų galimybes aptikti defektus (trūkius). Sensityvumas (jautrumas) yra gebėjimas nustatyti mažų trūkių vietą. Jis dažniausia didėja didėjant garso bangų (virpesių) dažniui (trumpinant bangos ilgį). Rezoliucija yra sistemos gebėjimas, nustatyti trūkių vietą, kurie yra šalia vienas kito medžiagoje ar esančius šalia paviršiaus. Rezoliucija taip pat dažniausiai didinama didinant dažnį. Tuo tarpu dažnio pasirinkimas priklauso nuo pačio tyrėjo ir aišku nuo pačio prietaiso konstrukcijos. Bangos dažnis yra priklausomas nuo prietaiso galimybių ir priešingai, prietaiso galimybės priklauso nuo naudojamų bangų (virpesių) dažnio. Taigi, pasirinkti optimalų dažnį testavime yra sudėtingas sprendimas. Reikia išlaikyti pusiausvyrą tarp naudingų ir nenaudingų rezultatų. Prieš pasirenkant bangos (virpesių) dažnį, kuris bus naudojamas, reikia įvertinti tokius aspektus kaip: struktūros grūdėtumas (grain structure), medžiagos storis, dydis, tikėtina trūkio vieta. Jei dažnis bus labai didelis, garsas pasklis nuo didelių ar šiurkščių, nelygių granuliuotų struktūros ir nuo mažų medžiagos netobulumų (mažų defektų), esančių jos viduje, todėl bus sunku įvertinti, ar egzistuoja struktūroje defektas. Kadangi medžiagoje būna daug dalelių, yra tikėtina, kad jos paskleis dalį garso energijos esant didesniai bangos dažniui. Todėl, prasiskverbianti jėga (arba maksimalus gylis, kuriame galima aptikti trūkius) sumažės. Lydytos medžiagos dažnai turi nelygių granuliuotų ir kitų garsą sklaidančių dalių, o tai reikalauja naudoti mažesnę dažnį, testuojant šiuos gaminius. Apdoroti ir kalti gaminiai su kryptinga ir tobula granuliuota (grain) struktūra, gali būti testuojami su aukštesnio dažnio signalo keitikliais [3]. Taigi, garso bangų (virpesių) dažnis yra svarbi charakteristika defektų nustatymui. Jis yra reguliuojamas signalo keitiklio. Todėl plačiau bus pažvelgta į šį ultragarsinio testavimo prietaiso komponentą.

## **Signalų keitikliai.**

### ***Pjezoelektriniai signalo keitikliai.***

Elektrinių pulsų (virpesių) vertimas į mechanines vibracijas ir vertimas grįžtančių mechaninių vibracijų atgal į elektros energiją yra ultragarsinio testavimo pagrindas. Signalų keitiklis yra labai svarbi ultragarsinės instrumentinės sistemos dalis. Signalų keitiklio šerdis – aktyvusis elementas – atlieka šį energijos vertimo darbą: elektrinę energiją verčia į akustinę ir atvirkščiai (pav. 26). Aktyviuoju elementu dažniausiai būna gabalėlis poliarizuotos medžiagos (tai yra, kai kurios šios medžiagos molekulės sudarantys atomai yra teigiamai įkrauti, o kiti yra neigiamai krūvio) su prijungtais elektrodais priešingose pusėse. Kai elektrinis laukas yra sukuriamas

medžiagoje, poliarizuotos molekulės išsirikiuoja elektriniame lauke. Tai sąlygoja dipolio susidarymą medžiagos struktūroje. Šis molekulių išsirikavimas sukelia medžiagos matmenų (dimensijų) kitimą. Aktyviajame elemente vykstantis reiškinys (fenomenas) yra žinomas kaip elektrostrikcija. Taigi, pastoviai poliarizuota medžiaga kaip kvarcas ( $\text{SiO}_2$ ) arba bario titanatas ( $\text{BaTiO}_3$ ) sukelia elektrinius laukus, dėl panaudotos mechaninės jėgos [6]. Šis reiškinys yra žinomas kaip *pjezoelektroninis efektas*.



**26 pav. Signalų keitiklio skersinis pjūvis** (matomas aktyvusis elementas).

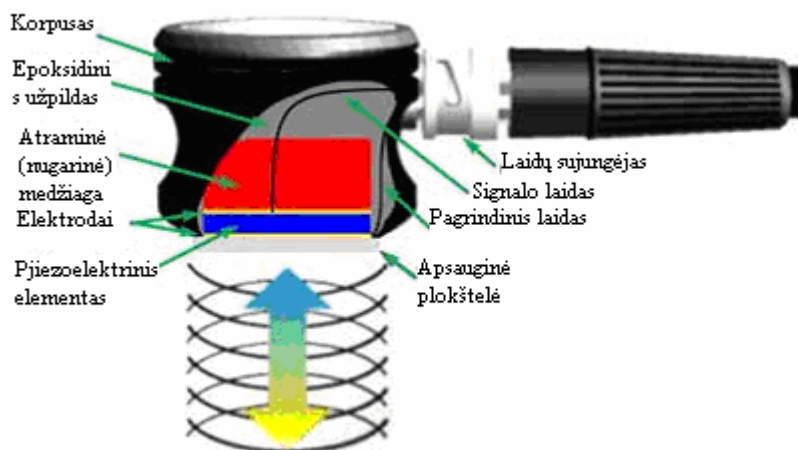
Kaip aktyvusis elementas daugumos šiandien naudojamų akustinių signalų keitiklių yra pjezoelektrinė keramika. Jos dydis lengvai gali būti keičiamas, todėl gali sukelti įvairaus dažnio bangas. Iki pjezoelektrinės keramikos pritaikymo (1950-ųjų metų), aktyviojo elemento gamybai buvo naudojami kvarco kristalai ir magnetostrikcinės medžiagos [6]. Kai pjezoelektrinė keramika buvo pristatyta, greitai ji tapo dominuojančia medžiaga signalų keitikliuose, dėl gerų pjezoelektrinių savybių ir jų įvairių formų ir dydžių gaminimo patogumo. Taip pat iš šios medžiagos pagamintas aktyvusis elementas gali veikti žemu voltažu ir gali būti naudojamas iki  $300^\circ\text{C}$  temperatūros.

#### *Pjezoelektrinių signalų keitiklių charakteristikos*

Kaip jau minėta, signalų keitiklis viduje turi pjezoelektrinį elementą, kuris verčia elektrinius signalus į mechaninius vibravimus ir mechaninius vibravimus į elektrinius signalus. Daug faktorių, apimant ir pačios medžiagos faktorius, mechaninę ir elektrinę konstrukciją, išorinės mechaninės ir elektrinės apkrovos sąlygas, daro įtaką signalų keitiklio elgsenai. Mechaninės konstrukcijos parametrai – tai spinduliuojančio paviršiaus plotas, mechaninis slopinimas, spinduliavimas, sujungimo tipas ir kiti fizinės konstrukcijos kintamieji [6]. Ypač išskyla problemų, kai reikia pagaminti du signalų keitiklius, turinčius identišką elgsenos charakteristikas.

27 paveiksle pavaizduotas tipiškas kontaktinis signalų keitiklis. Pjezoelektrinis elemento skersmuo yra pasirenkamas atsižvelgiant į norimo ilgio (dažnio) bangas. Skersmuo turi būti pusės norimos bangos ilgio. Tačiau norint gauti visą įmanomą energijos kiekį iš signalų keitiklio, tarp

aktyviojo elemento ir keitiklio paviršiaus yra patalpinamas varžų sutapatintojas (matching layer). Jo skersmuo optimaliausiu variantu yra  $\frac{1}{4}$  bangos ilgio. Varžų sutapatintojas išlaiko bangas, kurios yra atspindėtos jo viduje, fazėje. Kontaktiniuose keitikliuose yra naudojama medžiaga, kurios banginis pasipriešinimas yra tarp aktyviojo elemento ir plieno banginių pasipriešinimų, o panardinamuose keitikliuose – parenkama medžiaga, kurios banginis pasipriešinimas yra tarp aktyviojo elemento ir vandens. Kontaktiniuose signalo keitikliuose dažnai varžų sutapatintojas dar yra apsaugomas nuo įbrėžimų apsaugine plokštele.



27 pav. Kontaktinis signalo keitiklis.

Atraminė (nugarinė) medžiaga turi didelę įtaką signalo keitiklio spinduliavimo charakteristikai. Naudojant panašaus banginio pasipriešinimo, kaip ir aktyviojo elemento, atraminę medžiagą, galima išgauti efektyviausią spinduliavimą. Toks keitiklis turės siaurą spindulio plotį, kuris sąlygoja didesnę jautrumą.

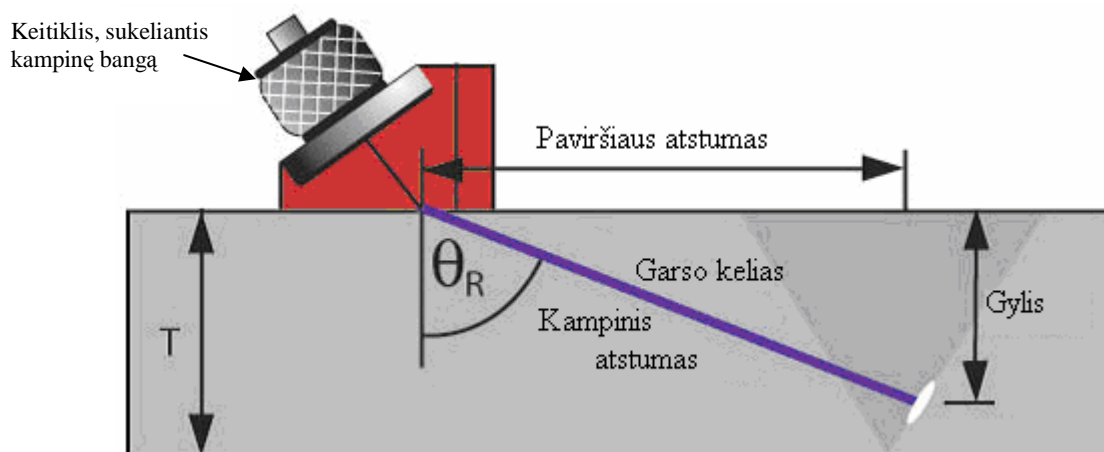
Kai kurie signalo keitikliai yra specialiai kuriami kaip efektyvesni spinduliatoriai, o kiti – kaip efektyvesni imtuvai. Signalo keitiklis, kuris puikiai veikia vienu atveju, nebūtinai garantuoja norimus rezultatus kitu atveju. Pavyzdžiui, keitiklio jautrumas mažiems defektams yra proporcingas keitiklio efektyvumui ir kaip spinduliatoriaus, ir kaip imtuvo. Rezoliucija (arba gebėjimas aptikti vienas šalia kito esančius arba arti paviršiaus esančius defektus) reikalauja stipriai spinduliuojančių signalo keitiklių.

Kalbant apie signalo keitiklio galimą dažnio diapazoną, reikia paminėti, kad platesnis keitiklio dažnis sąlygoja didelę skaidančią jėgą (resolving power), o siauresnio dažnio diapazono keitikliai turi mažesnę skaidančią jėgą, bet didesnę prasiskverbimą. Žemesnio dažnio (0.5Mhz-2.25Mhz) signalo keitikliai teikia didesnę energiją ir prasiskverbimą medžiagoje, o aukšto dažnio (15.0Mhz-25.0Mhz) – turi mažesnę prasiskverbimą, bet didesnę jautrumą mažiems trūkiams

(defektams). Tačiau labai aukšto dažnio bangų negalima sukelti, nes aktyvusis elementas turėtų būti labai plonas ir dėl to būtų per daug trapus ir silpnas [6].

Nors signalo keitikliai dažniausiai yra sukonstruoti taip, kad būtų apsaugoti nuo pažeidimų, tačiau jais naudojantis reikia būti atsargiems. Netinkamas naudojimas, kaip numetimas, gali pažeisti apsauginę plokštelę, aktyvųjį elementą ar atraminę (nugarinę) medžiagą. Signalo keitiklio sugadinimas dažniausiai yra pastebimas A skanavimo metu: matomas padidėjęs pirminis virpesys.

Taip pat yra kuriami signalo keitikliai, kuriais garso banga yra paleidžiama tam tikru kampu (pav. 28). Tokie keitikliai dažniausiai sukelia atsispindėjusias skersines bangas. Šio tipo signalo keitikliai garsą skleidžia kampu, o tai padidina įvairių trūkių aptikimo galimybes medžiagos viduje ir suvirinimo srityse.



**28 pav. Signalo keitiklis, sukeliantis kampines garso bangas.** ( $\theta_R$  – lūžimo kampas, T – medžiagos storis).

### ***Elektromagnetiniai – akustiniai keitikliai***

Elektromagnetinis-akustinis signalo keitiklis (EMAK) veikia pagal visiškai kitus fizikinius principus nei pjezoelektrinis signalo keitiklis. Šis signalo keitiklis nereikalauja tiesioginio kontakto su testuojamu objektu, bei jį naudojant nėra reikalinga jungianti medžiaga. Kai laidas yra pridamas ties elektriškai sužadinto objekto paviršiaus ir yra paleidžiama srovė norimo ultragarsinio dažnio, sūkurinė srovė sukeliama objekto artimiausioje paviršiaus srityje [6].

Svarbiausias EMAK pritaikymas nedestrukciniame testavime yra trūkių aptikimas ir medžiagos savybių charakteristika. Šie signalo keitikliai veikia nesant tiesioginiam kontaktui aukštoje temperatūroje ir nutolusiose srityse. Spiralinė ir magnetinė struktūra taip pat leidžia sukelti kompleksines bangas ir poliarizaciją, kurią būna sudėtinga sukelti pjezoelektriniuose tyrimuose, kur

yra naudojama sąveika su skysčiais. Taip pat EMAK leidžia pašalinti klaidas, susijusias su sąveikos nukrypimais, kurie atsiranda kontaktiniuose matavimuose. Yra galimos įvairios EMAK konfigūracijos, tačiau praktikoje yra naudojamas siauresnės šių keitiklių variacijos, nes dažniausiai yra reikalaujama stipraus magnetinio lauko ir didelių srovių, kad būtų sukeltas ultragarsas. Be to, tokiu būdu sukeltos ultragarsinės bangos dažniausiai būna silpnesnės negu naudojantis pjezoelektriniai signalo keitikliais.

### *Signalas – triukšmo lygis*

Kaip jau minėta, ultragarsinėje defektoskopijoje viena iš svarbiausių testavimo prietaiso dalių yra signalo keitiklis, kuris ir spinduliuoja ir priima signalus ir verčia juos į kitokios formos energiją. Taip pat jau buvo aptarta, kad ypač didelę reikšmę defekto aptikimui turi bangos ilgis (arba dažnis). Tačiau reikia paminėti, kad defekto aptikimo tikimybę sąlygoja ir daug kitų faktorių, kaip, pavyzdžiui, garso kiekis, kuris atsispindi nuo defekto. Šis atspindimas garso kiekis yra priklausomas nuo banginio pasipriešinimo neatitikimo tarp trūkio ir jį supančios medžiagos. Nustatyta, kad tuštuma yra geresnis reflektorius negu metalas, nes varžų nesutapimas yra didesnis tarp oro ir metalo, negu tarp dviejų metalų. Tačiau reikia paminėti, kad dažnai supanti medžiaga turi konkuruojančius (competing) atspindėjimus. Pavyzdžiui, mikrostruktūrinės granulės metaluose arba kituose agregatuose gali sukelti tokius atspindėjimus. Todėl yra matuojamas signalo – triukšmo lygis – lyginamas signalas nuo defekto su aplinkiniais atspindėjimais (triukšmais). Reikalaujamas minimalus signalo – triukšmo santykis yra 3 ir 1 [6].

Tyrimais nustatyta, kad triukšmo lygis ir aido, kilusio nuo “mažo” defekto, stiprumas priklauso nuo daugelio faktorių:

- Kruopštaus dydžio ir fokolinių (focal) savybių ištyrimo.
- Kruopštaus dažnio, pločio (bandwidth) ir efektyvumo ištyrimo.
- Testavimo trajektorijos ir atstumo (vanduo ir/ar/kietasis kūnas).
- Sąveikos paviršiaus (interface) (paviršiaus bangavimas ir grublėtumas, nelygumas).
- Trūkio vietos spindulio paleidimo atžvilgiu.
- Metalų mikrostruktūros būdingo triukšmingumo.
- Trūkiui būdingo atspindėjimo, kuris priklauso nuo banginio pasipriešinimo (akustinės varžos), dydžio, formos ir krypties.
- Lūžio ar kitokio defekto krypties (dauguma lūžių yra “nematomi” viena kryptimi ir stiprūs reflektoriai kita).
- Trūkio formos (daugiabriauniai trūkiai yra linę išsklaidyti garsą nuo keitiklio).



Pateikiama formulė sieja keletą kintamųjų, paveikiančių defekto signalas-triukšmas lygį [6]:

$$\frac{S}{N} = \sqrt{\frac{16}{\rho c_m w_x w_y \Delta t}} \frac{A_{trū} (f_0)}{FOM (f_0)} \quad (18)$$

čia  $S/N$  – signalo–triukšmo lygis,  $\rho$  – medžiagos tankis,  $c_m$  – garso greitis metale,  $w_x$  ir  $w_y$  – šoninis (lateral) spindulio plotis defekto gylyje,  $\Delta t$  – pulso trukmė,  $A_{trū}$  – trūkio išsklaidymo amplitudė dažnio centre,  $FOM$  – naudos skaitmuo (“Figure of merit”).

Vietoj to, kad gilintis į šios formulės sudarymo detales, geriau reikia paminėti keletą bazinių santykių. Signalas-triukšmas lygis, ir tuo labiau defekto aptikimas:

- Didėja, kuo didesnis yra trūkis (išsklaidymo amplitudė). Aptikimas defekto yra tiesiogiai proporcingas jo dydžiui.
- Didėja, kuo spindulys (beam) yra labiau sufokusuotas. Kitais žodžiais tariant, trūkio aptikimas yra priešingai proporcingas keitiklio signalo paleidimo pločiui.
- Didėja su mažėjančiu virpesio (pulso) pločiu (delta-t). Kitaip sakant, trūkio aptikimas yra priešingai proporcingas virpesio, kurį paleidžia keitiklis, trukmei. Kuo trumpesnis virpesys (dažnai didesnis dažnis), tuo geresnis defekto aptikimas.
- Sumažėja medžiagose, turinčiose didelį tankį ir/arba aukštą ultragarsinį greitį. Signalas/triukšmas lygis yra priešingai proporcingas medžiagos tankiui ir garso greičiui.
- Dažniausiai padidėja didėjant dažniui. Tačiau, kai kuriose medžiagose, kaip titanas, abu trūkio išsklaidymo amplitudė ( $A_{trū}$ ) ir “naudos skaitmuo” ( $FOM$ ) lygtyje keičiasi, keičiant dažnį. Taigi, kai kuriais atvejais, signalas-triukšmas lygis gali būti nepriklausomas nuo dažnio.

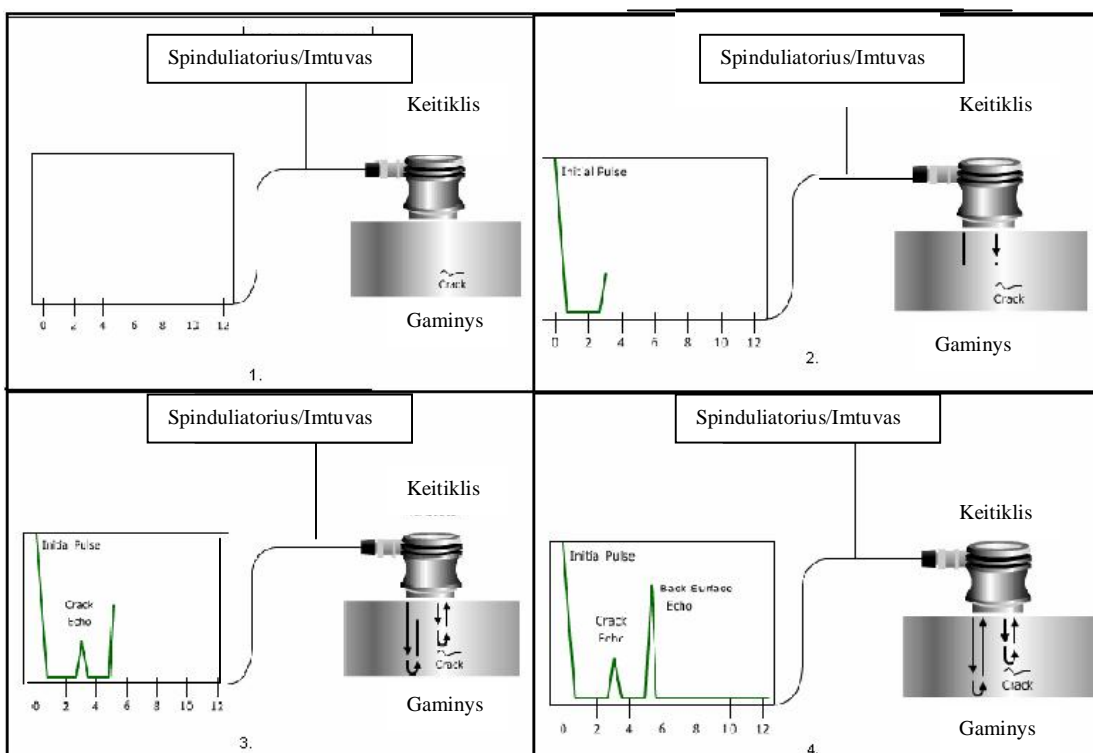
Taigi, daug faktorių įtakoja defekto aptikimo tikimybę. Tačiau dažniausiai kaip pagrindiniai ir svarbiausi išskiriami ultragarsinės bangos dažnis (arba bangos ilgis), testuojamos medžiagos charakteristikos: banginis pasipriešinimas, tankis, garso greitis.

## Tiriamoji dalis

### Aido metodas ultragarsiniame testavime (defektoskopijoje)

Kaip jau minėta, dažniausiai yra naudojamas aido metodas. Jis būna pakeičiamas kitais metodais tik tais atvejais, kai yra nepajėgus gaminio ar detalės testavimui dėl įvairių priežasčių. Todėl toliau dėmesys ir bus koncentruojamas į šį metodą ir jo prietaisus.

Kaip šis metodas veikia (pav. 29)?



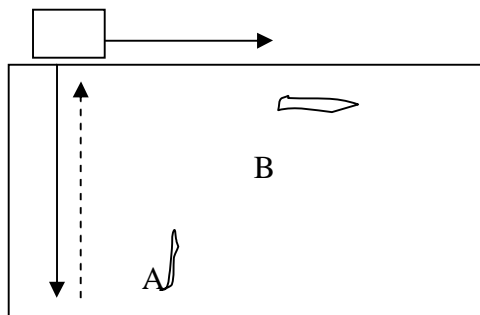
29 pav. Ultragarsinio testavimo aido metodas.

Signalo keitiklis, kuris yra susietas su testuojamu objektu, paleidžia ultragarsinį pulsą (virpesį) nuo 1MHz iki 20Mhz dažnio. Pulsas (virpesys) sklinda objektu ir yra atspindimas, išsklaidomas ar laužiamas dėl defekto ar trūkio medžiagoje. Imtuvas yra naudojamas, dažniausiai, grįžtančio aido signalo išsiaiškinimui. Signalo amplitudės praradimas ir laikas yra matuojami nustatant defekto egzistavimą ir jo didį. Defekto vieta yra apskaičiuojama vertinant bangos amplitudę ir tiksliai matuojant laiką pagal formulę [6]:

$$d = \frac{ct}{2} \quad (19)$$

čia  $d$  – atstumas, nuo paviršiaus iki defekto (arba galinio paviršiaus),  $c$  – garso bangos greitis,  $\tau$  – laikas, kurį sklido banga nuo signalo keitiklio, atsimušė į defektą (dugną) ir grįžo atgal.

Taigi, atliekant gaminio kontrolę ultragarsu galime nustatyti defekto dydį ir vietą. Kaip pavyzdį pasirinkome plieninį gaminį (pav. 30).



**30 pav. Gaminio kontrolė naudojantis paprastu signalo keitikliu.**

Tarkime atliekama plieninio gaminio kontrolė naudojantis paprastu signalo keitikliu. Gaminys yra 0,03 m storio. Gaminyje yra su trūkia A ir B. Jų vieta bei dydis yra nustatomi apžiūros metu, fiksuojant laiką nuo signalo paleidimo iki signalo sugrįžimo. Defektų vietą ir dydį nustatyti galime atliekant žemiau pateikiamas procedūras.

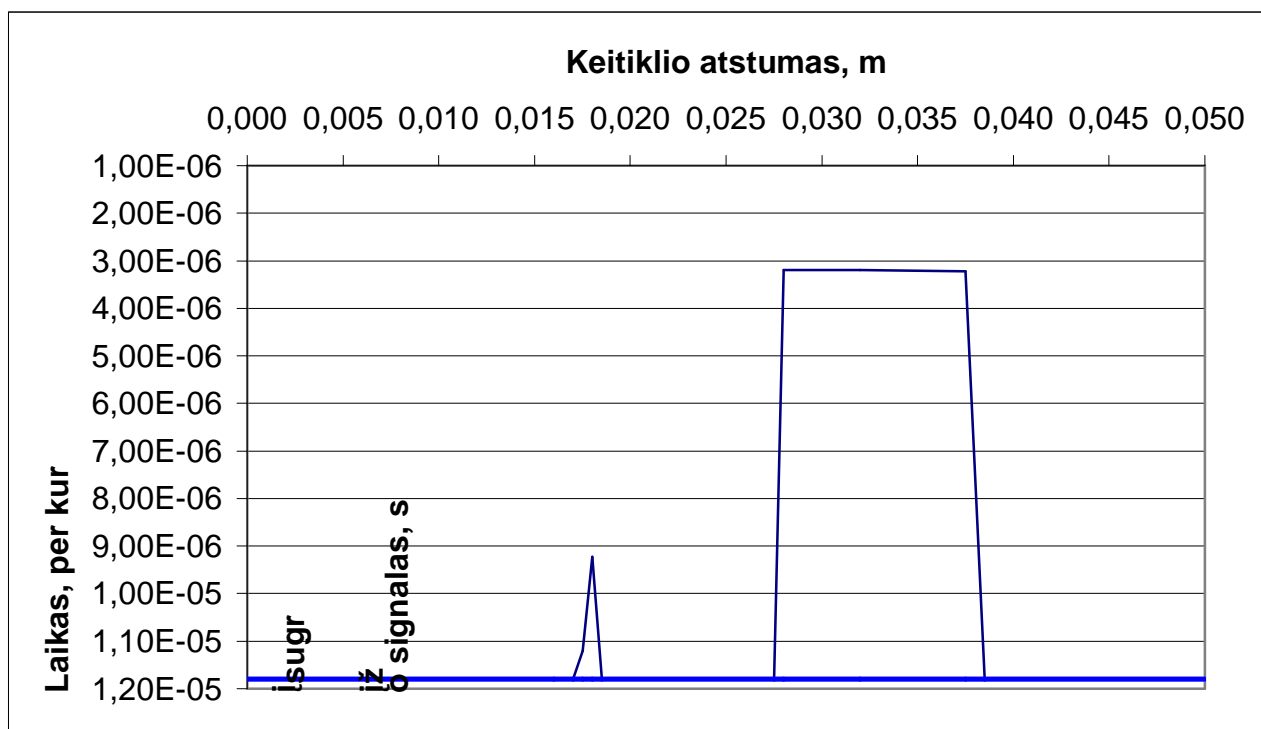
Pliene garsas  $c$  sklinda 5100 m/s greičiu (išilginės bangos) (remiantis (2) formule  $c = \sqrt{E / \rho}$ ).

Gaminiu garsas sklinda iki galinės gaminio sienelės ir grįžta atgal per  $1,18 \cdot 10^{-5}$  s (grafikas 1). Tai apskaičiuojame pagal (19) formulę ( $t = \frac{2d}{c}$ ). Tačiau testavimo metu, galime nustatyti šiek tiek kitokį laiką. Taip yra dėl to, kad atliekant eksperimentus, yra matuojamas laikas ir iš jo yra išvedamos gaminio storio (plonumo) reikšmės. Kaip rodo atliekami eksperimentai, kaip tik ultragarsiniu metodu galime labai tiksliai įvertinti gaminio storį (arba plonumą). Pavyzdžiui, Vladišauskas, Jacikevičius, Butkus ir Baršauskas (2005) atliko eksperimentinius tyrimus ultragarso metodo panaudojimo langų stiklo storio nustatyme. Mikrometru ir ultragarsu atlikti stiklo storio matavimai. Mikrometru nustatyti stiklo storiai: 4 mm, 6 mm, 8mm. Atlikus tyrimus ultragarsiniu metodu nustatyta, kad stiklo storiai atitinkamai buvo: 3,91mm, 5,96mm, 7,89mm [10]. Taigi, ultragarso metodas leidžia tiksliai įvertinti gaminio storį, nustatyti paviršiaus nelygumus, netgi esant priėjimui iš vienos pusės, todėl gali būti ir yra dažnai taikomas gaminio storio (plonumo) kontrolėje. Šiuo atveju, darome prielaidą, kad gaminys yra tiksliai 0,03m storio ir garsas jame nuo gaminio galinės sienelės grįš per  $1,18 \cdot 10^{-5}$  s.

Defekto A vietą galime nustatyti naudojantis ta pačia (19) formule. Prietaisas rodo, kad signalo keitiklį pastūmus 0,018m į dešinę, signalas grįžo per  $9,22 \cdot 10^{-6}$  s. Taigi, galime teigti, kad

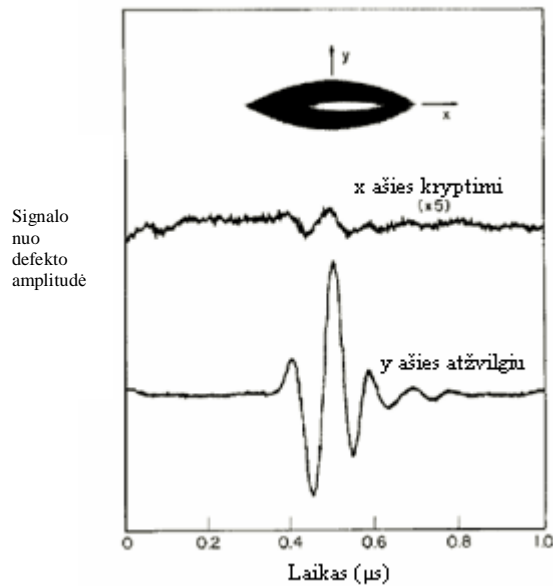
defektas A yra 0,018 metro nuo gaminio krašto ir 0,023511 metro atstumu nuo gaminio paviršiaus (gaminio gylyje) (grafikas 1).

Defekto B vieta apskaičiuojama analogišku būdu. Taigi defektas B yra 0,028 metro nuo gaminio kraštinės ir 0,00813 metro gaminio gylyje (pav. 31).



**31 pav. Garso bangos sklidimo iki galinės sienelės (arba defekto) ir grįžtančio aido laikas, stumiant signalo keitiklį gaminio paviršiumi.** (Iš grafiko galime susidaryti vaizdą apie gaminyje esančius defektus, jų vietą ir dydį).

Atlikdami tokią gaminio kontrolę galime nustatyti defekto ilgį. Taigi, defekto B dydį nustatyti šiuo būdu yra paprasta. Atliekami signalo laiko ir iš jo išvedamo atstumo skaičiavimai. Tuo tarpu vien tik naudojantis paprastu signalo keitikliu defekto A dydžio tiksliai galime ir neįvertinti, nes jis yra vertikalus. Be to, prie šio metodo trūkumų yra minima tai, kad linijiniai defektai, kurių kryptis yra paraleli garso ašiai, gali iš vis būti neaptikti. Todėl atliekant gaminio kontrolę yra naudinga naudoti kampinius signalo keitiklius, arba atlikti gaminio skanavimą jį pasukus (jei įmanoma), nes eksperimentais nustatyta, kad signalo stiprumas (amplitudės dydis) priklauso nuo defekto krypties (pav. 32). Todėl yra siūloma įvertinti aido pokyčius pasukant patį gaminį [4]. Taip galime tiksliau įvertinti defekto dydį bei kryptį.



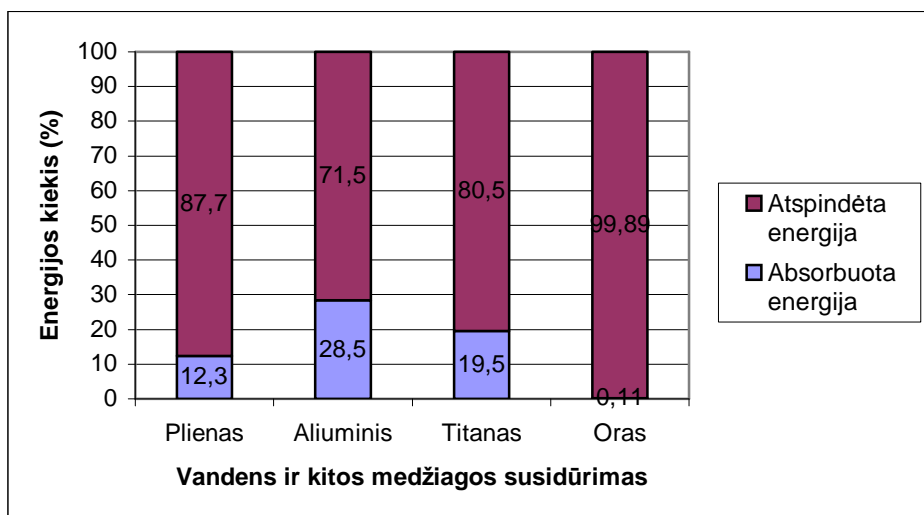
**32 pav. Signalų amplitudės priklausomybė nuo defekto krypties.**

Prieš atliekant gaminio kokybės kontrolę ultragarso metodu, kaip jau aprašyta teorinėje dalyje, reikia pirmiausia įvertinti testuojamo gaminio parametrus, bei medžiagines charakteristikas. Atsižvelgus į tai rinktis prietaisus, bei ultragarso charakteristinius dydžius: dažnį, intensyvumą, pulso trukmę, reikia įvertinti, kokia turi būti ultragarso amplitudė, kad garsas prasiskverbtų į norimą gylį ir kita.

Taigi, ultragarsinio testavimo metu svarbu įvertinti, koks yra testuojamos medžiagos banginis pasipriešinimas. Kaip teigiama literatūroje, kuo yra didesnis neatitikimas tarp dviejų medžiagų banginių pasipriešinimų, tuo daugiau ultragarso bangos energijos bus atspindima nuo jų susidūrimo vietos. Atspindėjimo koeficientą galime apskaičiuoti pagal (11) formulę

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2, \quad Z = \rho c.$$

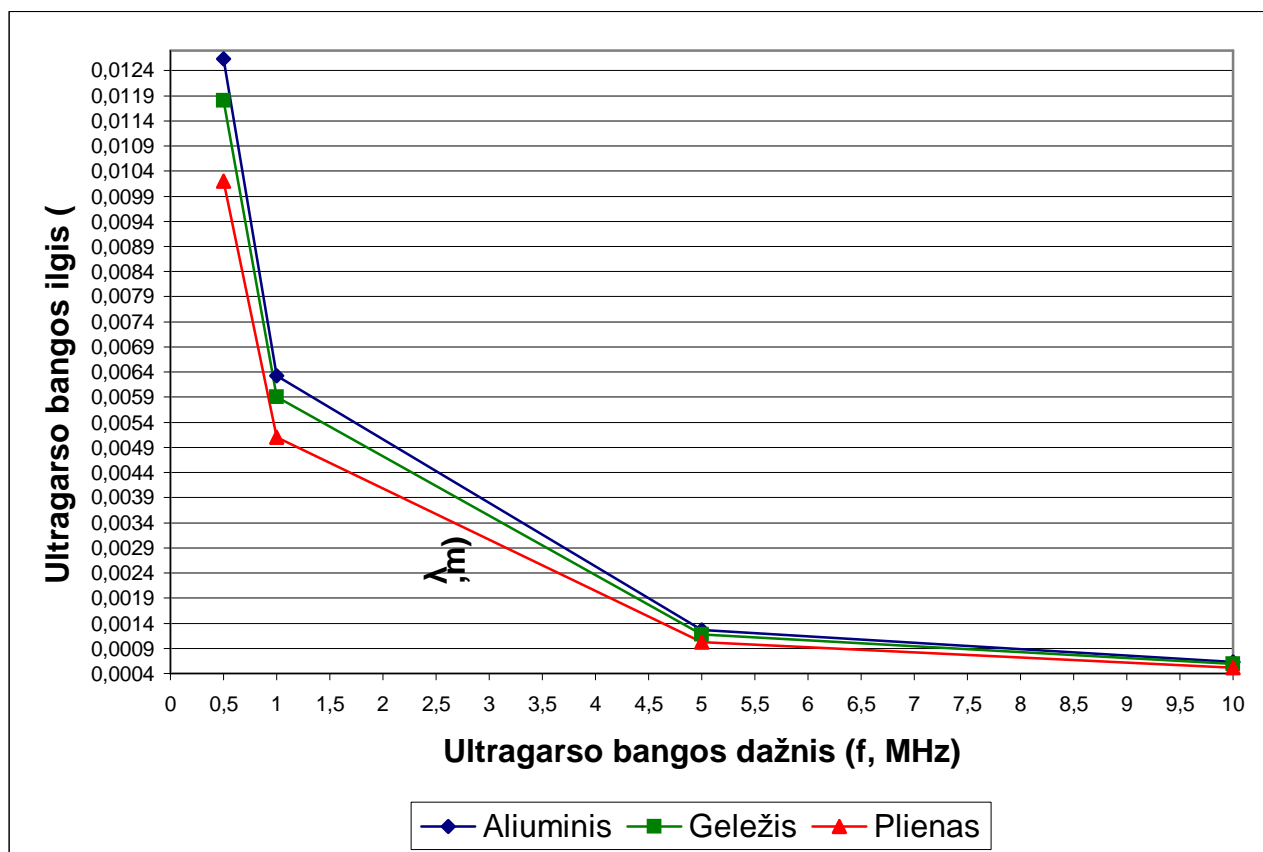
Keleto skaičiavimų rezultatus matome 33 paveiksle.



**33 pav. Atspindėtos ir absorbuotos energijos kiekliai (%) vandens ir kitų medžiagų susidūrime.**

Taigi, reikia įvertinti medžiagos banginį pasipriešinimą ir, atsižvelgus į jį, pasirinkti ultragarso intensyvumą (bangos amplitudę). Kaip matome iš 33 paveikslo, atliekant panardinto vandenyje gaminio kontrolę, didelė dalis ultragarso energijos yra atspindima, todėl pirminis pulsas turi būti pakankamai stiprus, kad būtų aiškiai užfiksuojamas signalas nuo defekto. Kai yra naudojamas kontaktinis signalo keitiklis, gaminys taip pat yra padengiamas plonu sluoksniu skysčio: alyvos, glicerino ar vandens, kad būtų kuo mažesni energijos nuostoliai, nes ore garsas sklinda ypač silpnai. Be to, didelis neatitikimas tarp oro ir vandens ar kietojo kūno banginių pasipriešinimų, dėl ko, praktiškai, garsas nepereina į kitą terpę.

Kaip jau buvo minėta, ultragarsiniuose testavimuose technikas turi nuspręsti kokio dažnio ultragarsinę bangą generuos signalo keitiklis. Keičiant dažnį, galime keisti garso bangos ilgį (remiantis (5) formule  $\lambda = \frac{c}{f}$ ) (pav. 34). O ultragarso bangos ilgis turi reikšmingą efektą trūkio (defekto) aptikimo tikimybei. Bendroji taisyklė apytikslio apskaičiavimo (praktinio metodo) yra: trūkis (defektas) turi būti didesnis nei pusė bangos ilgio, kad būtų aptiktas didele tikimybe [6]. Taip yra todėl, kad, jei defektas atitinka bangos ilgį, pasireiškia difrakcijos reiškinys – bangos užlinkimas už kliūtį, kurio metu vyksta energijos persiskirstymas ir gaunamas difrakcinis vaizdas, o ne matomas defektas, nuo kurio atsispindi banga. Taigi, kuo banga yra trumpesnė (dažnis didesnis), tuo mažesnius defektus galima aptikti. Pavyzdžiui, jei pasirinktume plieninio gaminio ultragarsiniame testavime naudoti 5MHz ultragarso bangą, galėtume aptikti (su didele tikimybe) defektus, kurių dydis >0,5mm. Be to, galimybė aptikti labai mažus arba arti vienas kito esančius defektus yra siejama su prietaiso sensitivityumu (jautrumu) ir rezoliucija.



34 pav. Ultragarso bangos, sklindančios medžiaga, ilgio priklausomybė nuo ultragarso dažnio.

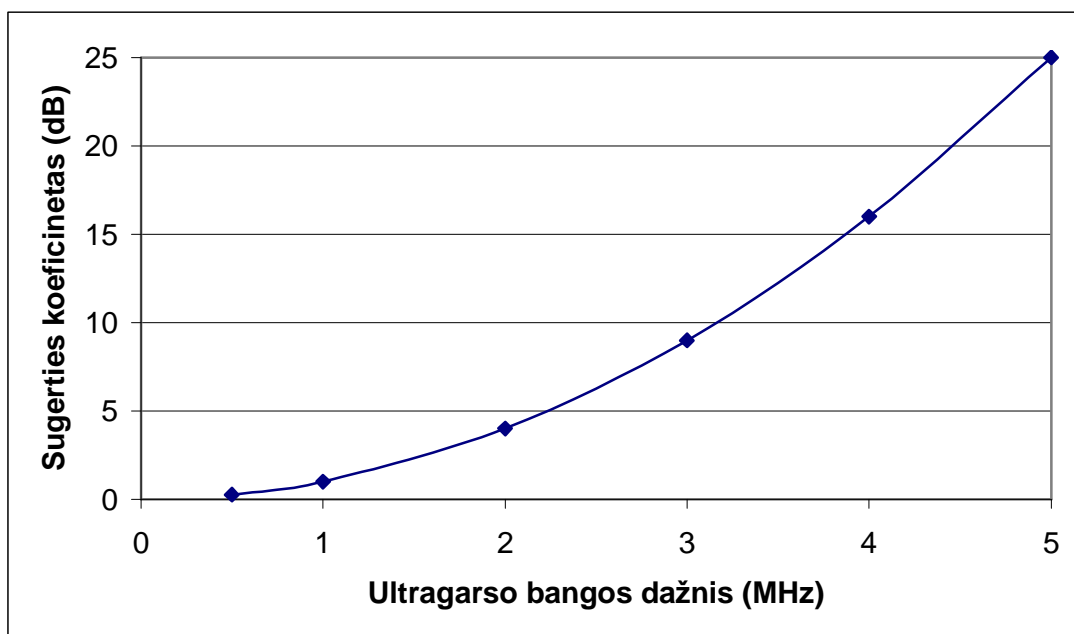
Tačiau reikia paminėti, kad didesnis ultragarsinės bangos dažnis yra susijęs su bangos prasiskverbimu. Kaip jau buvo minėta, garso bangai sklindant medžiaga pasireiškia garso bangos silpnėjimo efektas: mažėja bangos amplitudė bei intensyvumas (pav. 35). Garso bangos silpnėjimas yra nustatomas pagal (9) ir (10) formules. Jose matome, kad tai priklauso nuo sugerties koeficiento ir nuo atstumo nuo bangos šaltinio (pav. 36). Na, o literatūroje pateikiama, kad sugerties koeficientas yra susijęs su garso bangos dažniu, temperatūros (medžiagos šiluminio laidumo), kampo, kuriuo sklinda banga. Yra nustatyta, kad gėlame vandenyje silpnėjimo (sugerties) koeficientą galime apskaičiuoti pagal formulę:

$$a = (2,1 \times 10^{-10})(T - 38)^2 + 1,3 \times 10^{-7})f^2 \quad (20)$$

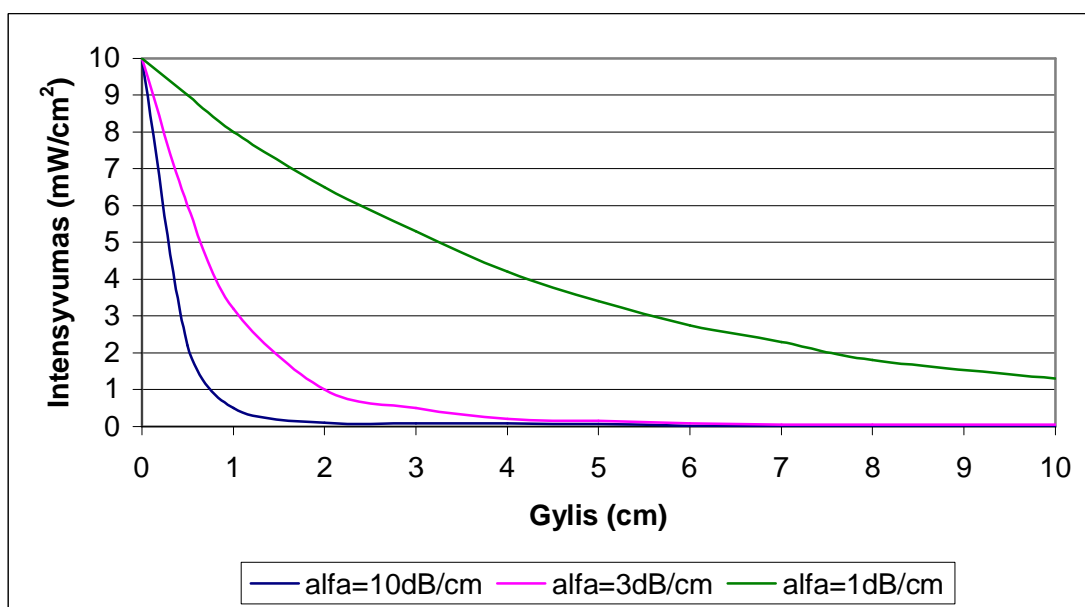
čia  $T$ - temperatūra,  $f$ - dažnis (kHz) [1].

Taip pat atlikti ultragarso silpnėjimo (sugerties) stikle eksperimentai. Jais nustatyta, kad nuo 10MHz iki 1THz garso bangos dažnio, kaip temperatūra yra 300K, bangos silpnėjimas yra tiesiogiai susijęs dažniu pakeltu kvadratu:  $\alpha(f) \sim f^2$  [3]. Kituose šaltiniuose supaprastintai pateikiama, kad sugertis didėja didėjant dažniui, bei didėjant atstumui nuo bangos šaltinio (gyliui), ir ši sugerties priklausomybė nuo dažnio ir gylio pateikiama taip [5]:

$$\alpha(\text{dB}) = \frac{1}{2} \times f(\text{MHz}) \times \chi(\text{gylis, cm}).$$



35 pav. Sugerties koeficiento priklausomybė nuo ultragarso bangos dažnio.



36 pav. Garso bangos intensyvumo silpnėjimas gylio atžvilgiu.

Taigi, prieš pasirenkant ultragarso bangos (virpesių) dažnį, kuris bus naudojamas, reikia įvertinti tokius aspektus kaip: struktūros grūdėtumas (grain structure), medžiagos storis, dydis, tikėtina trūkio vieta. Jei dažnis bus labai didelis, garsas pasklis nuo didelių ar šiurkščių, nelygių granuliu struktūros ir nuo mažų medžiagos netobulumų (mažų defektų), esančių jos viduje, todėl bus sunku įvertinti, ar egzistuoja struktūroje defektas. Be to, gaminio medžiagos struktūra gali įtakoti dalies energijos išskaidymą, kas taip pat sumažina ultragarso prasiskverbimą. Pasirinkus didesnį ultragarso dažnį taip pat susiduriame su padidėjusiu sugerties koeficientu ir to pasekoje



sumažėja maksimalus lygis, kuriame galime aptikti defektą. Taigi, tik įvertinus šiuos faktorius, jų atžvilgiu turime rinktis testavimo metu naudojamo ultragarso dažnį.

### ***Gaminio kontrolės ultragarsu privalumai ir trūkumai.***

Ultragarstinė apžiūra yra labai naudingas ir visapusiškas nedestrukcinio testavimo metodas. Keletas iš daugiau šio metodo privalumų, kurie dažniausiai yra minimi [6, 9, 18]:

- Nereikia panaudoti jėgos medžiagai.
- Tai yra jautrus abiejų paviršių ir subpaviršių nutrūkimams (defektams) metodas.
- Gylis prasiskverbimo defekto aptikimui ar matavimui yra labai didelis, lyginant su kitais nedestrukcinio testavimo metodais.
- Tik vienos pusės priėjimo tereikia, kai yra naudojama aido metodas.
- Tai yra didelio tikslumo metodas, nustatantis atspindžio vietą, dydį ir formą.
- Reikalauja minimalaus dalies paruošimo.
- Elektroninė įranga akimirksniu teikia rezultatus.
- Detalūs vaizdai gali būti sukurti (sudaryti) naudojant automatines sistemas, C skanavimą.
- Turi kitas panaudojimo galimybes kaip storio matavimas, šalia defektų aptikimo. Tai yra labai svarbu, siekiant nustatyti susiaurėjimo, medžiagos suplonėjimo vietas, kuriose gali atsirasti trūkių ir lūžių.

Bet kaip ir visi nedestrukciniai metodai, ultragarstinis testavimas turi keletą ribotumų, tokių kaip:

- Paviršius turi būti pasiekiamas (prieinamas) ultragarso siuntimui: reikia tiesioginio kontakto su testuojamu objektu arba turi būti tinkama jungianti terpė tarp jų, pavyzdžiui, vanduo.
- Įgūdžiai ir papildomas mokymasis yra daugiau reikalingas, negu kitų metodų naudojimuisi. Teigiama, kad yra sudėtinga vaizdo analizė, nors kompiuterinės programos šį darbą daro po truputį paprastesnį.
- Tai dažniausiai reikalauja suporuotų garso energijos (vidutinės – aukštos) siuntimų testuojamame pavyzdyje (egzemplioriuje).
- Medžiagas, kurios yra nelygios, grublėtos, nepastovios formos, labai mažos, ypatingai plonos ar nehomogeniškos, yra sudėtinga testuoti.
- Lieta (cast) geležis ir kitos neapdirbtos grūdėtos (grained) medžiagos yra sunkiai testuojamos, dėl silpno garso sklidimo ir aukšto signalo triukšmo.
- Linijiniai defektai, kurių kryptis yra paraleli garso ašiai, gali būti neaptikti.
- Reikia remtis (atsižvelgti) į standartus kalibruojant prietaisus ir charakterizuojant trūkius.

Norint efektyviai atlikti ultragarsinį testavimą, reikia daug žinoti apie šį metodą. Visgi, šis neoptinis metodas, tampa labai populiariu naudojant pulsuojančią lazerį, sukeliančią ultragarsinę bangą ir gali būti pritaikytas įvairiose srityse. Be to, kompiuterinių technikų pritaikymas gaminių kontrolėje naudojant ultragarsą labai palengvina vaizdo analizę, defektų parametrų nustatymą, bei technikų darbą šioje srityje.

## IŠVADOS

1. Literatūros analizė parodė, kad gaminių kontrolėje ultragarso metodai yra dažniausiai naudojami iš visų nedestrukcinių testavimo metodų, o aido metodu net 90% gaminių yra patikrinami. Šis metodas būna pakeičiamas kitais tik tais atvejais, kai yra nepajėgus gaminio ar detalės testavimui dėl įvairių priežasčių.
2. Gaminių kontrolė ultragarsu leidžia labai tiksliai įvertinti defektų vietą, dydį, bei kryptį.
3. Ultragarso testavimas – yra sudėtingas metodas, reikalaujantis didelio pasiruošimo bei žinių.
4. Prieš testavimą būtina įvertinti gaminio parametrus bei medžiagines charakteristikas (tankį, struktūrą, banginį pasipriešinimą, garso greitį, garso silpnėjimą) ir jų atžvilgiu rinktis testavimo metu naudojamo ultragarso dažnį (bangų ilgį), intensyvumą ir kitus parametrus.
5. Atlikta analizė parodė, kad didesnis ultragarso bangos dažnis (ir jo sąlygotas mažesnis bangos ilgis) leidžia aptikti mažesnius defektus. Tačiau didesnis ultragarso bangos dažnis taip pat sąlygoja didesnę bangos silpnėjimą (didėja sugerties koeficientas), kuris gali įtakoti mažesnę maksimalų bangos prasiskverbimą ir defektų, esančių giliau nuo gaminio paviršiaus, neaptikimą.
6. Svarbu įvertinti medžiagų akustinės varžos (banginius pasipriešimus), jų neatitikimą ultragarso bangai kertant skirtingų medžiagų susidūrimą ir jų atžvilgiu rinktis ultragarso bangos intensyvumą (bangos amplitudę).
7. Ultragarso testavime pritaikomos kompiuterinės technikos šį metodą daro dar tikslesnę, bei palengvina vaizdo analizę, defektų lokalizacijos ir dydžio apskaičiavimus. Be to, kompiuterinės programos (pvz. Imagine 3D) leidžia vizualizuoti ultragarso bangą, jos prasiskverbimą, atspindėjimą, be to gali padėti tiksliai nustatyti kur nepaaiškinami aido signalai kyla, bei pasirinkti tinkamiausią signalo keitiklį.
8. Pritaikomos kompiuterinės technikos automatizuoja gaminio kontrolės skanavimo procesą, o aukštos rezoliucijos prietaisai sudaro galimybes labai tiksliai, detaliam gaminio vaizdui sudaryti.
9. Darbe pateikti pagrindiniai ultragarso metodo principai, tačiau nemažai faktorių liko nepaliesta (kaip signalo keitiklių kalibravimas, ultragarso laukas, ultragarso spindulių (beam) pločio įtaka).

## SUMMARY

### *Control of product quality using ultrasound*

Ultrasonic method and its use in solid products quality control, its opportunities, advantages and disadvantages, perspective of usage in the future is analyzed in this Master's work. Analysis of literature show that this method has a lot of benefits comparing with other non-destructive methods, and is applied in more than 80% cases of quality control.

The echo method is the most popular ultrasonic method, and in practice is used to 90% of all ultrasonic methods. However, in this work other methods and their advantages are also described. Nevertheless, echo method has big advantage in the situations then there is access to product only from one side.

In this paper are overviewed basic principles of ultrasonic inspection paying more attention to defect localization and size determination opportunities. Also there is done analysis of sound frequency influence on defect detection and sound wave attenuation. Attention is also paid to defect detection, localization and sizing by making ultrasonic inspection view analysis.

## LITERATŪRA

1. Davidson, M. 1999. *Transmission loss*. UK, University of Plymouth  
<http://freespace.virgin.net/mark.davidson3/TL/TL.html> [žiūrėta 2006 04 20].
2. Diederichs, R, Ginzl, E. 2006. *Nondestructive Testing Encyclopedia*.  
<http://www.ndt.net/article/az/ndtmain.htm> [žiūrėta 2006 04 16].
3. Fabian, J., Allen, P.B. 1999. *Theory of Sound Attenuation in Glasses: The Role of Thermal Vibrations*. Physical review letters, Vol. 82, Nr.7.  
[http://www.glue.umd.edu/~jfabian/PRL\\_99a.pdf](http://www.glue.umd.edu/~jfabian/PRL_99a.pdf) [žiūrėta 2006 04 19].
4. Garton, M. 1997. *Refining automated ultrasonic inspections with simulation models*. E-žurnalas NTD.net, Vol.2, Nr.10, <http://www.ndt.net/article/garton/garton.htm#chapter1> [žiūrėta 2006 04 30].
5. Helguera, M. 2005. *Ultrasound tutorial*. Ultrasound imaging group,  
<http://www.cis.rit.edu/research/ultrasound/ultraintro.htm>, [žiūrėta 2006 04 20].
6. NTD resource center. 2005. *Introcuccion to ultrasonic testing*. [http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc\\_ut\\_index.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm) [žiūrėta 2006 03 10].
7. Jonušas R. ir kt.2004. *Koncentruotos energijos metodų taikymas apdirbant medžiagas*. Kaunas: Technologija.
8. Mašonis A. 1985. *Ultragarsinė technologija*. Vilnius.
9. *Non-Destructive Testing of Materials*. 2005. [http://www.ieo.dit.ie/technical\\_ndt.html](http://www.ieo.dit.ie/technical_ndt.html) [žiūrėta 2006 04 10].
10. Robinson, A.L. 2006. *X-Ray data booklet. Hystory of synchrotron radiation*.  
[http://xdb.lbl.gov/Section2/Sec\\_2-2.html](http://xdb.lbl.gov/Section2/Sec_2-2.html) [žiūrėta 2006 04 06].
11. Savage, M.A. 2000. *USS Kitty Hawk Techs Search Out Defects*. California, Comnavairpac press, <http://www.airpac.navy.mil/news/pr2000/pr00-091.asp>, [žiūrėta 2006 04 10].
12. *UTEX Scientific products*. 2006  
<http://www.utex.com/Products/Simulation/I3dviewer/i3dvwr.htm>, [žiūrėta 2006 04 28].
13. Vladišauskas, A., Jakevičius, L.,Butkus, J., Baršauskas, K. 2005. *The use of ultrasound for determination of the thickness of glass panes of windows*. E-žurnalas *Ultragarsas*, Nr.1, 2005, <http://www.ndt.net/article/v10n07/vladisauskas/vladisauskas.htm>, [žiūrėta 2006 04 06]
14. Алешин Н. П., Белый В. Е. и др. 1989. *Методы акустического контроля металлов*. Москва: Машиностроение.

15. Герасимов В.Г. и др. 1986. *Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий*. Москва.
16. Домаркас В. Й. 1988. *Ультразвуковая эхоскопия*. Ленинград.
17. *Ультразвуковые преобразователи*. 1972. Ред. Кикучи, Е. Москва: Мир.
18. Хорбенко, И.Т. 1978. *Звук, ультразвук*. Москва: Знание.
19. Шарп Р. 1972. *Методы неразрушающих испытаний*. Москва.