

Paviršinių išilginių ir paviršinių skersinių bangų sąveikos su išoriniu kampu eksperimentiniai tyrimai

S. Sajauskas, V. Minialga

Prof. K.Baršausko ultragarso mokslo institutas, KTU

Studentų g. 50, LT-3031 Kaunas, Lietuva

Įvadas

Kietųjų izotropinių kūnų, kurių Puasono koeficientas $0,26 < \sigma < 0,5$, laisvame paviršiuje gali būti sužadintos dviejų tipų paviršinės akustinės bangos, susidedančios iš skersinės ir išilginės virpesių dedamųjų, sklindančių išilgai paviršiaus. Pagal vyraujančią dedamąją, nusakančią šių bangų fizikinę prigimtį ir lemiančią jų fizikines savybes, šias dvi bangas vadinsime paviršinėmis išilginėmis bangomis (PIB) ir paviršinėmis skersinėmis bangomis (PSB). Pastarosios bangos literatūroje vadinamos jų atradėjo Dž. Reilėjaus (Rayleigh) vardu.

PSB bangos yra gerai iširtos teoriškai ir eksperimentiškai ir dėl mažo slopimo, plačiai naudojamos neardančiuose ultragarsiniuose bandymuose, ultragarsiniuose matavimuose. Tuo tarpu 1972 m. atrastoms PIB [1, 2] skirta daugiau teorinių studijų [3-5] nei eksperimentinių tyrimų. Ilgą laiką buvo abejojama, ar jos apskritai egzistuoja, mat manyta, kad panašios nehomogeninės bangos gali egzistuoti tik kietojo kūno paviršiaus riboje su skysčiu [6], vėliau suabejota šių bangų praktiniu naudingumu dėl joms būdingo prigimtinio slopimo [7]. Nors tai neigiamai atsiliepė PIB tyrimams - sumažėjo dėmesys joms, tačiau šiuo metu PIB naudojimą neardantiems bandymams reglamentuoja tarptautinės normos ir žymiausių firmų rekomendacijos [8-10].

Vis dėlto PIB nėra pakankamai iširtos, o mūsų eksperimentiniai tyrimai [11, 12] nepatvirtino teoriniuose darbuose aprašytų jų neigiamų savybių – itin didelio savojo slopimo. Pavyzdžiui, I. Viktorovas teoriniame darbe [7] nurodo, kad PIB e kartų nuslopsta bangos ilgio atstumu ir daro išvadą, jog praktinio intereso šios bangos nekelia. Kitas eksperimentiškai nepasitvirtinęs teorinis teiginys – galimybė smarkiai sumažinti prigimtinį PIB slopimą plonu skysčio sluoksniu, suformuotu kietojo kūno paviršiuje [7, 13]. Mūsų atlikti eksperimentiniai tyrimai patikimai patvirtino atvirkščią reiškinį – PIB energijos susikonzentravimą sluoksnyje po kietojo kūno paviršiumi ir dėl to pasireiškiančią silpną kietojo kūno paviršiaus būsenos (paviršiaus šiurkštumo, nelygumo, skysčio sluoksnio egzistavimo) įtaką PIB sklidimui (slopimui, faziniam greičiui). Ši kanalinio sklidimo ypatybė leido PIB efektyviai panaudoti sriegtų, rupiai apdorotų gaminių ir jų paviršių [14] neardomiesiems bandymams, kurių praktiškai negalima atlikti naudojant PSB (Reilėjaus bangas).

Pažymėtina, kad ilgą laiką sprendžiamą eksperimentinio sužadavimo ir tyrimo problemą, gvildant darbuose [15], išsprendė efektyviai žadindami PIB pirmu kritiniu kampu Krautkrėmerio tipo keičiamo kampo išilginių bangų keitikliais [10].

Tirdami kietojo kūno paviršiaus reljefo įtaką paviršinių bangų slopimui [16], pastebėjome, kad PSB sąveikaudama su paviršiniu nelygumu (specialiai suformuota paviršiaus struktūra), transformuojasi į greitesnę PIB. Šis reiškinys paskatino eksperimentiškai iširti paviršinių bangų sąveiką su išoriniu kampu, siekiant nustatyti paviršinių ultragarso bangų atspindžio nuo defektų dėsningumus, svarbius neardantiems bandymams.

PIB bangų teorija

Teoriškai PSB ir PIB buvo nustatytas nagrinėjant tūrinių išilginių bangų lūžį kietajame kūne, krintant joms į paviršių smailiu kampu iš akustiškai minkštesnės medžiagos (skysčio) pirmuoju ir antruoju kritiniais kampais. Pirmuoju kritiniu kampu krintančios bangos nuo kietojo kūno visiškai atsispindi, ir, šliauždamos jo paviršiumi, sužadina paviršinę išilginę bangą. Panašiai antruoju kritiniu kampu kritusi tūrinė išilginė banga transformuojasi į skersinę bangą, kuri, visiškai atsispindėjusi, šliaužia paviršiumi ir sužadina paviršinę skersinę bangą.

Matematiškai banginis procesas kietojo kūno paviršiuje aprašomas banginėmis lygtimis

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \frac{1}{c_l^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{1}{c_t^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}, \quad (2)$$

čia φ ir ψ - poslinkio potencialai išilgai ir skersiai paviršiaus; c_l ir c_t – tūrinių išilginių ir skersinių bangų faziniai greičiai kietajame kūne; x ir z – koordinatės išilgai ir statmenai paviršiumi; t – laikas.

Potencialai φ ir ψ išreiškiami formulėmis [5, 17]:

$$\varphi = A \exp \left[-z \sqrt{k^2 - k_l^2} + i(kx - \omega t) \right], \quad (3)$$

$$\psi = B \exp \left[iz \sqrt{k_l^2 - k^2} \right] + i(kx - \omega t), \quad (4)$$

čia k_l ir k_t – tūrinių išilginių ir skersinių bangų skaičiai ($k_l < k < k_t$); ω - kampinis dažnis, A ir B – pastoviosios.

Išsprendus šias bangines lygtis, gaunama šeštosios eilės būdingoji (Reilėjaus) lygtis, kuriai [4] suteiktas toks pavidalas:

$$16(1-r^2)^{-6} + 8(2r^2-3)^{-4} + 8m^{-2} - 1 = 0; \quad (5)$$

čia

$$\bar{m} = \bar{k} / k_t,$$

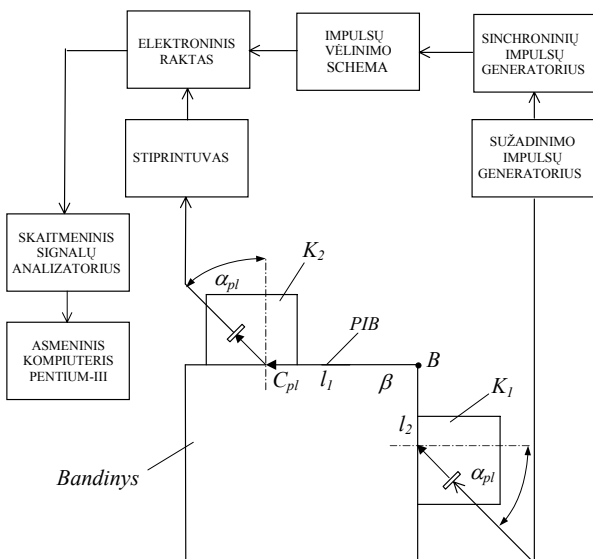
$$r = k_l / k_t = c_t / c_l.$$

Kaip parodyta [7], ši lygtis turi vieną realiąją šaknį, kurią atitinka PSB kietuosiuose kūnuose, kurių Puasono koeficientas $0,26 < \sigma < 0,5$, ir vieną kompleksinę šaknį, kurią atitinka PIB. Šaknies kompleksiskumas rodo, kad PIB netgi idealioje medžiagoje yra slopstanti paviršinė banga. Kaip parodyta [5], ši prigimtinį PIB slopinimą sukelia tūrinių skersinių bangų išspinduliavimas į kietąjį kūną, PIB sklindant išilgai jo paviršiaus. [4] apskaičiuota, kad idealiam izotropiniame kietajame kūne PIB paviršiaus ($z=0$) virpesių normalinės dedamosios amplitudė W yra mažesnė nei išilginės dedamosios amplitudė U . Tuo tarpu PSB – atvirkščiai.

Pažymėtina, kad iš teorinių tyrimų išplaukia, jog PIB fazinis greitis c_{pl} yra Puasono koeficiento funkcija, ir medžiagoms, kurių $\sigma < 0,32$, $c_{pl} > c_l$.

Tyrimo metodika ir aparatūra

Paviršinių bangų sąveikai su išoriniu kampu tirti naudojama schema, pavaizduotą 1 pav.



1 pav. Paviršinių bangų sąveikos su išoriniu kampu tyrimo schema: K_1 , K_2 – keičiamo kampo išilginių bangų keitikliai, l_1 , l_2 – atstumai nuo keitiklio priekinės briaunos iki bandinio kampo

Pavaizduotoji dviejų kampinių keitiklių schema buvo naudojama paviršinių bangų perėjimui ir transformavimuisi į kito tipo paviršines bangas tirti. Joje keitiklio K_1 sužadinta paviršinė banga priimama keitiklio K_2 . Tai leidžia išvengti sužadinimo generatoriaus elektrinių indukcijų į signalo grandinę ir tirti bangas, nusklidusias nedideliais atstumais, išvengti daugkartinių atspindžių įtakos, tiriant mažus bandinius. Tuo tarpu paviršinių bangų atspindžiui nuo išorinio kampo tirti buvo naudojama modifikuota schema, kurioje vienu kampiniu keitikliu sužadinami ir priimami ultragarsiniai impulsai. Pažymėtina, jog tyrimo schema gali būti perderinama taip, kad, pavyzdžiui, sužadinamos vieno tipo paviršinės bangos

(PSB, kampu α_{ps}), o priimami kito tipo paviršinės bangos signalai (PIB, kampu α_{pl}). Tiriama, kaip PIB bangos transformuojasi į PSB, atsispindėdamos nuo kampo, buvo panaudoti du keitikliai, sustatyti vienas už kito taip, kad toliau nuo išorinio kampo esantis keitiklis žadintų PIB, o arčiau esantis – priimtų PSB.

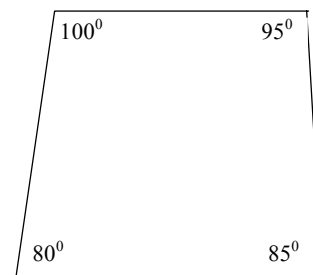
Tuo tarpu atvirkštinė schema, kurioje tolimesnis keitiklis sužadina PSB, o artimesnis priima PIB, netinka tikslesniems tyrimams dėl to, kad PIB ėmiklis mechaniškai slopina po juo sklindančias PSB.

Tyrimams buvo pagamintos trys poros identiškų 1,8, 2,5 ir 4,0 MHz dažnio keičiamo kampo keitiklių. Tiriamieji bandiniai pagaminti iš aliuminio lydinio ($\sigma=0,345$), kuriame, kaip parodė tyrimai [16], ypač efektyviai sužadinamos ir silpnai slopsta PIB.

PIB ir PSB atspindžio ir perėjimo kampinės priklausomybės tyrimai

Paviršinių bangų atspindžio (perėjimo) priklausomybei nuo išorinio kampo tirti buvo pagamintas specialus aliuminio lydinio $55 \times 65 \times 75$ mm bandinys (2 pav.).

2 pav. pavaizduotas bandinys leido atlikti matavimus PSB, tačiau buvo per mažas greitoms PIB tirti, nes atsispindėję PIB impulsai susiliedavo su žadinančiojo elektrinio impulso pašaline indukcija. Be to, signalų interpretavimą sunkino ir pašaliniai daugkartiniai atspindžiai bandinyje. Todėl PIB tyrimams buvo pagamintas didesnis - $300 \times 470 \times 20$ mm bandinys.



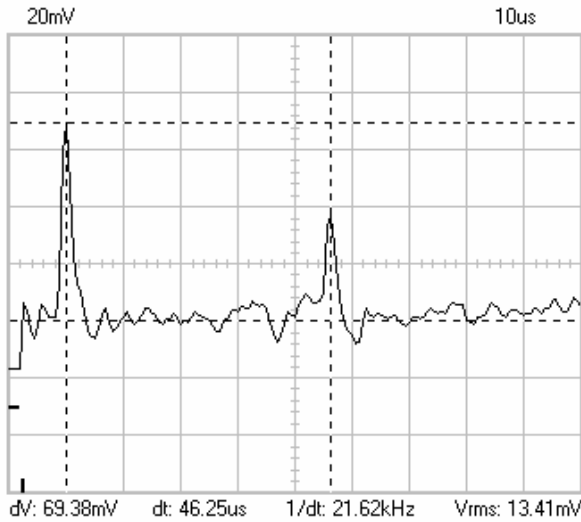
2 pav. Skirtingus kampus β turintis aliuminio lydinio bandinys

3 pav. pavaizduoti 1, 8 MHz PSB bangų signalai, atsispindėję nuo $\beta=85^\circ$ (1-sis impulsas) ir $\beta=95^\circ$ (2-sis impulsas) kampų, užregistruoti skaitmeninio signalų analizatoriaus ekrane.

Paviršinių bangų signalų normuotų amplitudžių matavimo rezultatai pateikti 1 ir 2 lentelėse.

1 lentelė. Nuo išorinio kampo atsispindėjusių ir jį perėjusių PIB signalų santykinės amplitudės

Kampas β°	85	90	95
$(U_{pl}/U_{pl,max})_{atstp}$	1,00	0,34	0,18
$(U_{pl}/U_{pl,max})_{pr}$	0,74	0,83	1,00



3 pav. Nuo skirtingų bandinio kampų atsispindėję PSB impulsai

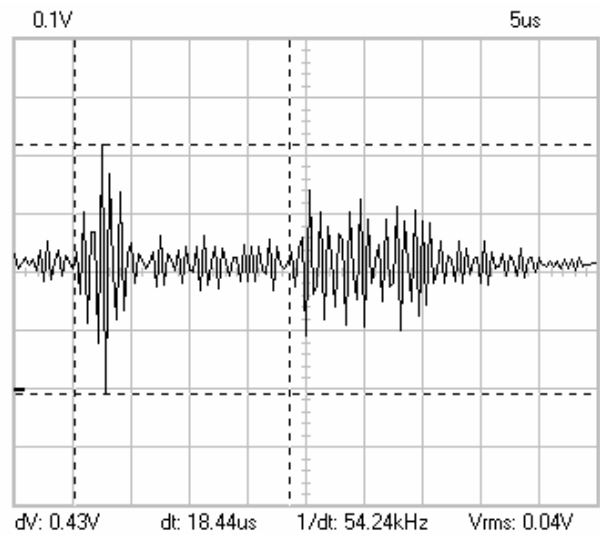
2 lentelė. Nuo išorinio kampo atsispindėjusių PSB signalų santykinės amplitudės

Kampas β^0	80	85	90	95	100
$(U_{ps}/U_{ps\ max})_{atsp}$	0,53	0,76	0,84	0,93	1,00
$(U_{ps}/U_{ps\ max})_{pr}$	1,00	0,94	0,88	0,78	0,65

Kaip matyti iš 1 ir 2 lentelių, statusis kampas turi didelę įtaką PIB ir PSB atspindžiui ir perėjimui, be to, šios bangos skirtingai (priešingai) atsispindi ir pereina po sąveikos su išoriniu kampu. Pažymėtina, kad atspindžio ir perėjimo rodiklių skaičiavimas pagal šiuos rezultatus būtų nekorektiškas, nes dalis energijos, sąveikaudama su išoriniu kampu, virsta kito tipo paviršinėmis bangomis, taigi, be atspindžio ir perėjimo rodiklių, būtina skaičiuoti ir transformavimo rodiklį. PIB banga geriau atsispindi nuo smailesnio kampo, nes PIB bangos energijai susikoncentravus dviejų bangos ilgių storio sluoksnyje po paviršiumi, jos atsispindi pagal geometrinės akustikos dėsnius. Tuo tarpu PSB bangoms, kurių energijos maksimumas yra paviršiuje, sąveikaujant su kampu, sužadinas taškas B, kuris perspinduliuoja abiejų tipų bangas abiejuose statmenuose paviršiuose. Taip vieno tipo paviršinė banga virsta kito tipo paviršine banga.

Paviršinių bangų transformavimosi į kito tipo paviršines bangas tyrimas

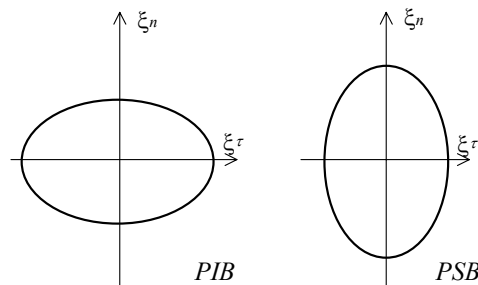
Tiriant paviršinių bangų transformavimąsi į kito tipo paviršines bangas, sužadintysis ir priimantysis keitikliai suderinami skirtingais kampais – 1-am ir 2-am kritiniams kampams. 4 pav. pavaizduoti dėl bangų tipo transformavimosi skirtingomis sąlygomis gauti ultragarso signalai.



4 pav. PIB keitiklio už 90^0 kampo priimti signalai, sužadinti prieš kampą PSB keitiklio. $f=1,8\text{ MHz}$, $l_1=l_2=40\text{ mm}$ (1 pav.)

Pirmasis impulsas – tai PSB signalas, transformavęsis ant kampo į PIB, antrasis signalas – tai tiesioginė PSB banga, dėl pjezoelemento difrakcijos priimta PIB keitiklio, suderinto pirmajam kritiniam kampui.

Paviršinių bangų transformavimosi į kito tipo paviršinę bangą dėsningumas ir skirtumas galima paaiškinti materialių dalelių judesio jėgose dėsniais. 5 pav. pavaizduota dalelių judesio trajektorija PSB ir PIB.



5 pav. Paviršiaus dalelių judesio trajektorijos PIB ir PSB: ξ_n , ξ_τ – normalinės ir tangentinės virpesių dedamųjų amplitudės

Dėl to, kad PSB normalinė virpesių dedamoji didesnė už tangentinę, jai suvirpinus kampinį tašką B, statmename paviršiuje (ašies z kryptimi) normalinė dedamoji virsta tangentine, o tangentinė – normaline. Taigi PSB transformuojasi į PIB, sklindančią kitame kampą β sudarančiame paviršiuje. Akivaizdu, kad PSB efektyviau transformuojasi į PIB, nes PIB sklinda kiek gilesniame sluoksnyje ir silpniau sužadina kampinį tašką B.

Išnagrinėtas paviršinių bangų transformavimosi mechanizmas leidžia teigti, kad medžiagose, kurių Puasono koeficientas didesnis, PSB transformavimas į PIB gali būti efektyvesnis jų generavimo būdas, nei sužadinant kitais būdais (kampiniu keitikliu).

Išvados

PIB ir PSB savybių teorinė analizė bei lyginamieji eksperimentiniai tyrimai parodė, kad, priešingai nei teigiama teoriniuose darbuose, jos gana efektyviai sužadinamos kampinio keitiklio, suderinto pirmajam kritiniam kampui. Šių bangų sąveikos su išoriniu kampu tyrimai parodė vieno tipo paviršinės bangos transformavimosi į kito tipo paviršinę bangą mechanizmą. Pasiūlytas efektyvus būdas PIB bangoms generuoti stačiojo kampo briaunoje, transformuojant jas iš PSB.

Padėka

Autoriai dėkoja Lietuvos valstybiniam mokslo ir studijų fondui, parėmusiam naujo tipo akustinių bangų tyrimus.

Literatūra

1. **Серейкайте-Юозонене Л. В.** Интерферометрический метод измерения скорости ультразвука в веществах, находящихся в конденсированном состоянии. Труды вузов Литовской ССР. Ультразвук. 1972. № 4. С. 113-118.
2. **Юозонене Л. В.** Измерение скорости звуковых волн, распространяющихся в поверхностном слое вещества. Материалы 2-ой всесоюзной конференции по вопросам методики и техники ультразвуковой спектроскопии. Каунас, 1973. С. 87-88.
3. **Couchman J. C., Bell J. R.** Prediction, detection and characterization of a fast surface wave produced near the first critical angle. Ultrasonics. 1978. No. 16. P. 272-274.
4. **Юозонене Л. В.** Упругие поверхностно-продольные волны и их применение для неразрушающего контроля. Дефектоскопия. 1980. № 8. С. 29-38.
5. **Викторов И. А.** Звуковые поверхностные волны в твердых телах. Москва: Наука, 1981.-288 с.
6. **Викторов И. А., Зубова О. М.** О двух типах поверхностных волн в кубических кристаллах. Акустический журнал. 1974. Т. 20. Вып. 6. С. 912-914.
7. **Викторов И. А.** О волнах в изотропном твердом полупространстве. Акустический журнал. 1976. Т. 22. Вып. 5. С. 675-678.
8. **Erhard A., Wüsterberg H., Schulz E., Mundry E.** Anwendung der longitudinalen Kriechwellen in der zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschall und Erfahrung beim Einsatz von Kriechwellenkopfen. Materialprüfung. 1982. N 24. S. 43-48.
9. **Erhard A., Wüsterberg H., Schulz E.** Kriechwellen in der Ultraschallprüfung. Physikalische Grundlagen. Anwendung bei Schweisskonstruktionen. Schweißen und Schneiden. 1983. B. 35. S.220-223.
10. **Krautkrämer J., Krautkrämer H.** Werkstoffprüfung mit Ultraschall. Berlin – Heidelberg - New York – London – Paris - Tokyo: Springer Verlag, 1986. 752 p.
11. **Sajauskas S., Minialga V., Sajauskas N.** Šiurkštumo tyrimas ultragarsinėmis paviršinėmis skersinėmis ir paviršinėmis išilginėmis ultragarso bangomis. Ultragarsas. Kaunas: Technologija. 2000. Nr.3(36). P.33-35.
12. **Minialga V., Sajauskas S., Sajauskas N.** Influence of liquid on the propagation of ultrasonic SAW on the rough surface. The Journal of Non-Destructive Testing. 15th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT). 15-21 October 2000 in Rome (Italy). Materials and Instrumentation. - *http://www.ndt.net*, idn.727.- 6 p.
13. **Юозонене Л. В.** Поверхностно-продольные волны и землетрясение. Труды международного семинара “Волновые механические системы”. Каунас. 1996. С. 122-135.
14. **Разыграев Н. П.** Обнаружение поверхностных дефектов под грубой поверхностью с помощью головной волны. Дефектоскопия. 1981. № 3. С. 21-23.
15. **Васькова В. И., Викторов И. А.** О возбуждении вытекающей квазипродольной волны. Акустический журнал. 1981. Т. 27. Вып. 5. С. 724-729.
16. **Sajauskas N.** Akustinių paviršinių išilginių bangų aparatūrinis tyrimas (daktaro disertacijos santrauka). Kaunas, 2000. P. 20.
17. **Брховских Л. М.** Волны в слоистых средах. Москва, 1966. 167с.

S.Sajauskas, V.Minialga

Experimental investigation of interaction of longitudinal surface acoustic waves or transversal surface acoustic waves and external corner

Summary

Peculiarities of reflection, transmission and transformation into SAW of other type onto external corner for longitudinal surface waves (LSAW) and transversal surface (Rayleigh) acoustic waves (TSAW) were investigated experimentally. Reflection and permeation of SAW studied in angles range from 80° till 100°. Longitudinal surface and transversal surface waves were excited and detected using prismatic transducers tuned on the 1st and on the 2nd critical angles. It was established that transformation of surface transversal waves into surface longitudinal waves on the edge of solid body may be used for generation of surface longitudinal waves.

Pateikta spaudai 2002 03 13