

## Paviršinių išilginių akustinių bangų sužadavimo problema

### S. Sajauskas

Elektronikos inžinerijos katedra, KTU

Studentų g. 50, LT-3031 Kaunas, Lietuva

#### Įvadas

Paviršinės išilginės bangos (PIB) [1-7] dėl jų savybės skliti negiliai prie kietojo kūno paviršiaus (“šliaužti”) užsienio literatūroje dažnai vadinamos *Kriechwellen* (vokiškai) [8-11], *creeping waves* (angliškai) [12-15]. Rusiškoje terminijoje vartojami dar kitą jų savybę atspindintys terminai. Tarkim, terminu *vytekajuščijiesia volny* (angl. *leaky waves*) [16], verčiamu kaip ištekančios, šiuo atveju - išsispinduliuojančios bangos, nusakoma jų savybė savo kelyje Briusterio kampu spinduliuoti šonines skersines bangas. O terminu *golovnyje* [17] nusakoma jų savybė skliti didžiausiu faziniu greičiu, t. y. būti priekyje, ten, kur paprastai būna galva. Beje, terminų gausa sukelia nemažai painiavos, nes terminu *head wave* vadinama tiesioginė tūrinė skersinė banga (TSB) [15].

Įsigilinę į šių bangų fiziką, suprasime, kad terminas “paviršinė išilginė banga” geriausiai atspindi jos esmę. Šioje paviršinėje bangoje materialų dalelių virpesių išilginė dedamoji  $\xi_{PIB}$  viršija skersinę  $\xi_{PIB}^s$  (priešingai nei Reilėjaus, kitaip - paviršinėje skersinėje bangoje (PSB), kurioje skersinė virpesių dedamoji  $\xi_{PSB}^s$  yra didesnė nei išilginė  $\xi_{PSB}$ ).

Šis esminis skirtumas lemia ir visas specifines PIB savybes – šliaužiamąjį sklidimo pobūdį (*kriechen, creeping*), didžiausią sklidimo greitį (*golovnyje*), prigimtinį slopinimą, persispinduliuojant į tūrinę skersinę bangą (*vytekajuščijiesia*), taip pat ir svarbiausią specifinę ypatybę – skirtingas nei PSB sužadavimo sąlygas. Vienas iš efektyviausių paviršinių bangų sužadavimo kietajame izotropiniame kūne metodų yra tūrinių išilginių bangų (TIB) transformavimas į paviršines kietojo kūno paviršiuje, besiribojančiame su kūnu, kurio savitasis akustinis impedansas mažesnis. Kaip žinome, PSB (Reilėjaus) susižadina, kai TIB kritimo kampas lygus antrajam kritiniam kampui ir lūžusi tūrinė skersinė banga šliaužia išilgai paviršiaus. Tuo tarpu PIB susižadina pirmuoju kritiniu kampu, kai išilgai paviršiaus šliaužia lūžusi TIB [11]. Suprantama, kad dėl šių skirtingų sužadavimo sąlygų PSB fazinis greitis artimas TSB faziniam greičiui  $c_T$ , o PIB – TIB faziniam greičiui  $c_L$ .

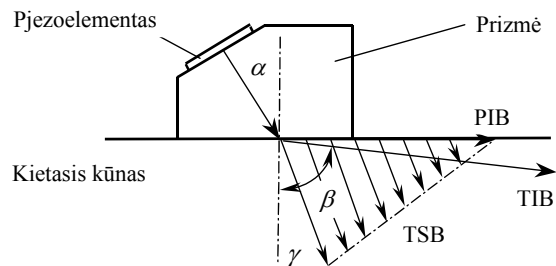
Kadangi PIB greitis yra didesnis nei TSB, tai pasireiškia efektas, panašus į Čerenkovo (optikoje), smūginės bangos (mechanikoje), ir dėl to PIB Briusterio kampu išsispinduliuoja į kietąjį kūną šoninę TSB.

#### PIB sužadavimo metodai

Tyrinėjant PIB sužadavimo efektyvumą kampiniais keitikliais ir jų taikymą neardomiesiems ultragarsiniams bandymams (ultragarsinėje defektoskopijoje), nustatyta, kad dažnai terminu *Kriechwellen* nusakomos ne PIB, bet

dvių bangų – PIB, sklindančios paviršiumi, ir TIB, sklindančios nedideliu kampu į paviršius, visuma, apibūdinama vokišku žodžiu *Bündel* (ryšulys, pluoštas).

1 pav. pavaizduotas kampinis keitiklis, skirtas neardomiesiems bandymams PIB (*Kriechwellen*) [18]. TIB egzistavimo šalia PIB priežastis yra TIB difrakcija, esant baigtinių matmenų pjezoelementui, kai jo skersinio matmens santykis su akustinės bangos ilgiu  $d/\lambda_L < \infty$  [19]. Kartu nustatyta, kad, didinant santykį  $d/\lambda_L$ , TIB sklidimo kietajame kūne kampas ( $90^\circ - \beta$ ) gali būti sumažintas. Tačiau, kaip parodyta [10], netgi esant  $d/\lambda_L = 40$ , kampas  $90^\circ - \beta \approx 6^\circ$ .



1 pav. PIB keitiklio neardomiesiems bandymams schema

Kita vertus, TIB sklidimo kampas  $\beta < 90^\circ$  gali reikšti, kad prizmėje sklindančių TIB kritimo kampas  $\alpha \neq \alpha_{kr}^1$ . Dėl to PIB bangų sužadavimas nėra optimalus. Bendruoju atveju čia galimi trys atvejai:

- 1 – kai  $\alpha < \alpha_{ki}^1$ ;
- 2 – kai  $\alpha = \alpha_{ki}^1$ ;
- 3 – kai  $\alpha > \alpha_{ki}^1$ .

Pirmuoju atveju (2 pav., a) dėl TIB difrakcijos PIB sužadavimas nėra optimalus, o kietajame kūne šalia PIB kampu  $\beta$  sklinda TIB.

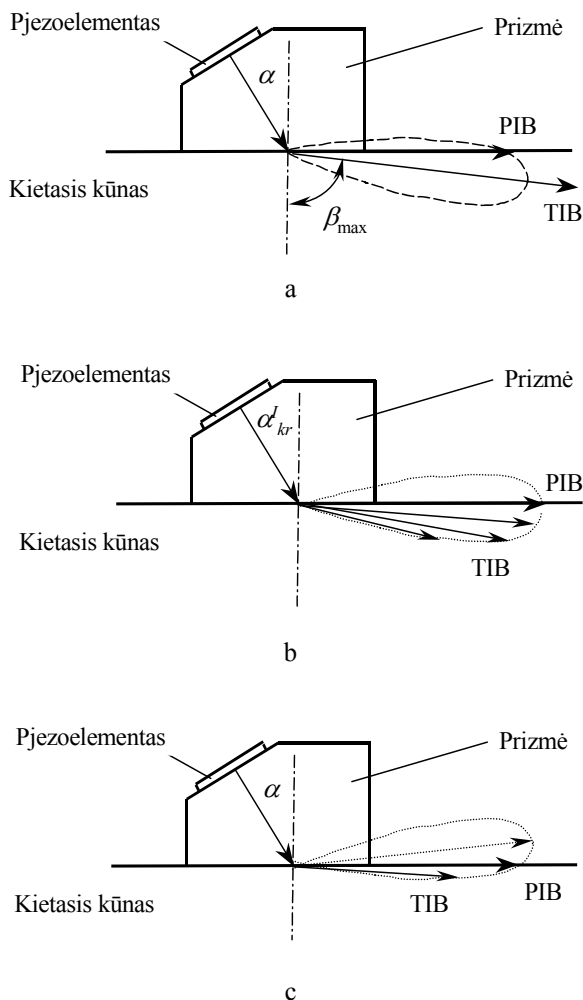
Antruoju atveju (2 pav., b) sužadinama maksimalios amplitudės PIB, šalia kurios kaip neišvengiamas pašalinis veiksnys egzistuoja ir liekamoji TIB.

Trečiuoju atveju (2 pav., c), TIB sąveikaujant su kietojo kūno paviršiumi, sužadinama taip pat ne didžiausios amplitudės PIB, o kietajame kūne dėl difrakcijos, nors ir silpnesnės, egzistuoja silpnos liekamosios TIB.

Akivaizdu, kad kampiniu keitikliu, kuriuo kietajame kūne sukuriama PIB ir TIB (1 pav.), galima aptikti paslėptą defektą, esantį kietajame kūne negiliai, prie paviršiaus, tačiau, kai  $c_{PIB} \neq c_L$ , tikslus defekto padėties nustatymas yra susijęs su akustinių bangų, atsispindėjusių nuo jo, greičio neapibrėžtumu. Todėl tiriant PIB fizikines savybes ir jas taikant metrologijoje, tarkim, matuojant

kietųjų kūnų fizikines bei mechanines konstantas [4, 15], būtina atskirti PIB nuo TIB. Čia reikia turėti omeny, kad priklausomai nuo medžiagos Puasono koeficiento  $\sigma$  gali būti  $c_L > c_{PIB}$  arba  $c_L < c_{PIB}$ . Todėl neatskyrus PIB signalų nuo TIB, sudėtiniam dviejų skirtingo tipo bangų pluoštui nekorektiška vartoti fazinio bangų greičio terminą.

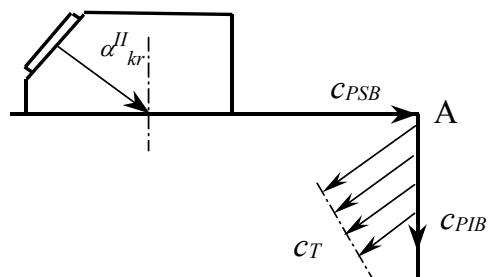
Kaip vienas iš metodų gauti "švarią" PIB gali būti panaudotas PSB transformavimas į PIB, schemiškai parodytas 3 pav. [19]. Kietojo kūno briaunoje (taškas A) PSB efektyviai transformuojasi į PIB, nes jos virpesių skersinė dedamoji  $\xi_{PSB}^s$  statmename paviršiuje už kampo A virsta PIB išilgine dedamoja  $\xi_{PIB}^s$ , o PIB išilginė dedamoji  $\xi_{PSB}^l$  virsta  $\xi_{PIB}^l$ . [19].



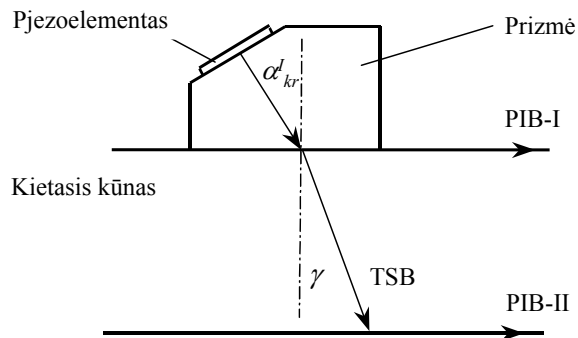
2 pav. TIB difrakcijos įtaka PIB sužadinimo kietajame kūne efektyvumui (TSB kietajame kūne neparodytos): a)  $\alpha < \alpha_{kr}$ ; b)  $\alpha = \alpha_{kr}$ ; c)  $\alpha > \alpha_{kr}$

Kita galimybė sužadinti gryną PIB - panaudoti kietajame kūne lūžusią TSB, kuri kitoje, lygiagrečioje, kietojo kūno plokštumoje sužadina antrinę PIB (4 pav.) [10, 15]. Šis metodas gali būti panaudotas rezervuarų (katilų, reaktorių korpusų) vidinių paviršių neardomiesiems ultragarsiniams bandymams [20].

Dar vienas metodas, kuriuo gali būti sužadintos PIB be vyraujančios TIB, yra sužadinimas impulsiniu lazeriu [21]. Norint sugeneruoti PIB tiesiniu sklidimo frontu, naudojamas lazerio spindulio fokusavimas cilindrinio lęšiu į tiesės atkarpą kietojo kūno paviršiuje.

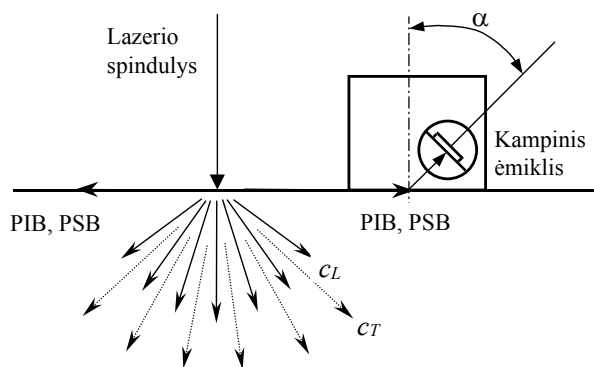


3 pav. PIB sužadinimas, pereinant PSB 90° briauną



4 pav. Antrinės PIB sužadinimo schema (šoninės TSB neparodytos)

Tokių atvejų sužadinami trumpi akustiniai impulsai, kurių spektro plotį lemia lazerio impulso ilgis ir kietojo kūno šiluminis laidumas. Šio metodo trūkumas tas, kad vienu metu sugeneruojama keletas skirtingų tipų akustinių bangų – TIB, TSB, PIB bei PSB. Priimant kampiniu keitikliu, iš visų galimų bangų galima atskirti norimas paviršines bangas, tarkim, PIB. Pažymėtina, kad tūrinės bangos šiuo atveju neturi vyraujančios krypties, taigi jos išspinduliuojamos visomis kryptimis plokštumoje, statmenoje cilindrinio lęšio židinio linijai (5 pav.).

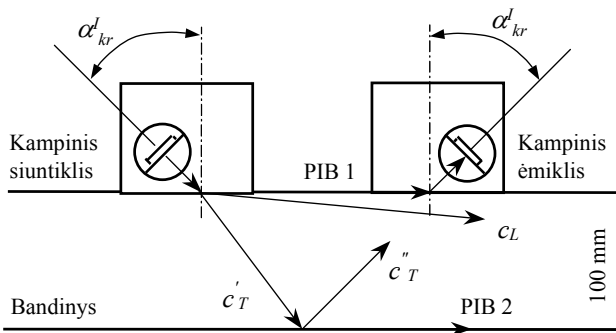


5 pav. Lazerio spindulio sužadintų PIB priėmimas kampiniu keitikliu

Naudojant rubininį lazerį, kurio impulso trukmė  $\approx 30$  ns, buvo sužadinti gana stiprūs plataus spektro PIB impulsai [21], galintys būti gera priemone PIB faziniam greičiui ir spektriniam slopinimui kietuosiuose kūnuose matuoti.

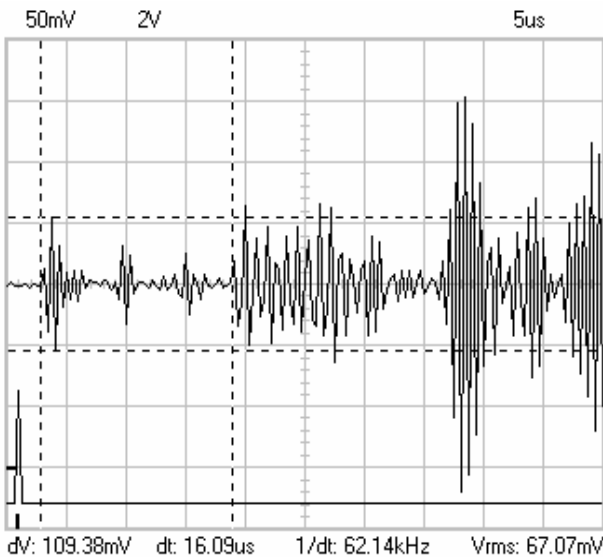
### Eksperimentiniai rezultatai

Praktiniai tyrimai buvo atlikti specialiaame 220×100×20 mm bandinyje iš aliuminio lydinio 6063-T6 (Švedija), kuriame išmatavome TIB greitį  $c_L = 6368$  m/s. Nustatyta, kad, sužadinant PIB keičiamo kampo pjezoelektriniu keitikliu, suderinus išilginių bangų kritimo kampą  $\alpha = \alpha_k^I$ , PIB nuo TIB geriausiai atskiriamos priimant jas tokiu pat kampiniu keitikliu (6 pav.). Tokiu atveju pašalinės TIB negali turėti įtakos PIB priėmimui ir jų greičio matavimui.



6 pav. PIB eksperimentinių tyrimų dviem keičiamo kampo keitikliais schema

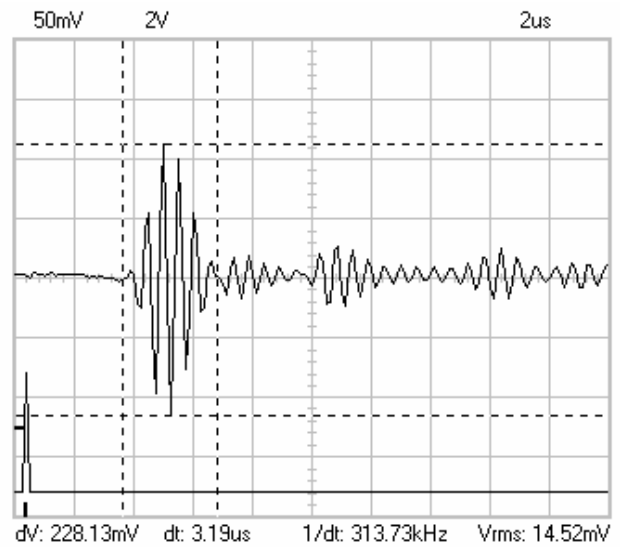
1,8 MHz kampinį siuntiklį sužadinus smūgine įtampa, ėmiklis priima signalą, registruojamą firmos *Velleman* skaitmeniniu osciloskopu *PCS64i* (7 pav.).



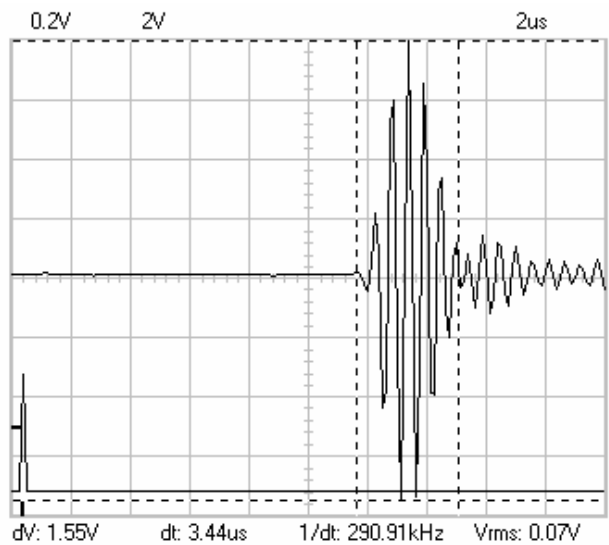
7 pav. Priimtas akustinis signalas. Keitiklio DACH centrinis dažnis  $f=1,8$  MHz

Signalą sudaro trys akstinių impulsų grupės. Pirmieji impulsai – tai PIB impulsai (pagrindinio ir atspindžių kampinio keitiklio prizmėje). Antroji grupė – tai dėl pjezoelemento difrakcijos sužadintų PSB impulsai. Trečioji grupė (stipriausieji) – tai TSB, atsispindėję nuo apatinio plokščiojo bandinio paviršiaus ( $c_T''$ ).

Palyginimui suderinus keitiklių kampus  $\alpha = \alpha_k^I$  buvo sužadinamos taip pat PSB (Reilejaus) (8 pav., b), išmatuoti abiejų paviršinių bangų greičiai ir amplitudės -  $c_{PIB} = 6160$  m/s,  $c_{PSB} = 2940$  m/s; amplitudžių santykis  $A_{PSB}/A_{PIB}=6,8$ .



a



b

8 pav. PIB (a) ir PSB lyginamieji signalai, gauti ta pačia keičiamo kampo keitiklių pora ( $f=1,8$  MHz)

Pažymėtina, kad  $\alpha = \alpha_k^I \approx 28^\circ$  atveju kampinio keitiklio prizmėje vyksta daugkartiniai vidiniai atspindžiai ir dėl reverberacijos gaunami pašaliniai suvėlinti impulsai. Tuo tarpu PSB atveju signalas "švarus". Pašaliniai PIB impulsai apsunkina matavimus paviršinėmis išilginėmis bangomis, gali sukelti sudėtingo signalo, pavyzdžiui, pavaizduoto 7 pav., interpretavimą. Todėl projektuojant PIB keitiklyje turi būti numatytos papildomos konstrukcinės priemonės akustinei reverberacijai sumažinti (prizmės vidinių sienelių profiliavimas atsitiktiniu būdu, taip išsklandant nuo jų atsispindėjusius signalus; reverberacijos signalų gaudyklių, sugeriančių pašalinius ultragarso impulsus, įtaisymas ir kt.).

## Išvados

PIB sužadavimo metodų analize nustatyta, kad, sužadinant ir priimant PIB keičiamo kampo keitikliais, galima jas efektyviai atskirti nuo pašalinių TIB, taip pat tiksliai išmatuoti jų greitį ir signalo stiprumą.

Eksperimentiškai patvirtinta, kad PIB greitis skiriasi nuo TIB greičio kietajame kūne, todėl PIB naudojant matavimams, būtina jas atskirti nuo pašalinių TIB.

Lazerinis PIB impulsų sužadavimo metodas leidžia generuoti itin trumpus ultragarso impulsus, todėl gali būti naudingas tiksliai PIB fazinio greičio ir spektrinio slopinimo kietuosiuose kūnuose matavimams.

Konstruojant PIB kampinius keitiklius būtina numatyti antireverberacines konstrukcines priemones.

## Padėka

Autoriai dėkoja Lietuvos mokslo ir studijų fondui, parėmusiam PIB tyrimus.

## Literatūra

1. **Серейкайте-Юозонене Л. В.** Интерферометрический метод измерения скорости ультразвука в веществах, находящихся в конденсированном состоянии. Труды вузов Литовской ССР. Ультразвук. 1972. N 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. **Ермолов И. Н., Разыграев Н. П., Щербинский В. Г.** Использование акустических волн головного типа для ультразвукового контроля. Дефектоскопия. 1978. №1. С. 33-40.
4. А. с. № 757910 (СССР). Способ измерения упругих постоянных твердых изотропных тел / **Юозонене Л. В., Саяускас С. И.** Заявл. 1978.07.05. Оpubл. Бюллетень изобретений. 1980. № 31.
5. А. с. № 759951 (СССР). Способ измерения скоростей объемных поперечных и продольных ультразвуковых волн в твердых телах / **Юозонене Л. В., Саяускас С. И.** Заявл. 1978.06.22. Оpubл. Бюллетень изобретений. 1980. № 32.
6. А. с. № 887940 (СССР). Устройство для измерения скорости ультразвука в твердых телах / **Саяускас С. И., Юозонене Л. В.** Заявл. 1979.10.16. Оpubл. Бюллетень изобретений. 1981. № 45.
7. **Юозонене Л. В.** Упругие поверхностно-продольные волны и их применение для неразрушающего контроля. Дефектоскопия. 1980. № 8. С. 29-38.
8. **Ehrhard A., Wüstenberg H., Schulz E., Mundry E.** Anwendungen der longitudinalen Kriechwelle in der zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschall und Erfahrungen beim Einsatz von Kriechwellenprüfköpfen. Materialprüfung. 1982. T. 24. Nr. 2. S. 43-48.
9. **Erhard A., Wüstenberg H., Schulz E.** Kriechwellen in der Ultraschallprüfung. Physikalische Grundlagen. Anwendung bei Schweisskonstruktionen. Schweißen und Schneiden. 1983. B. 35. S. 220-223.
10. **Ehrhard A., Kröning M.** Erzeugung, Ausbreitung und Anwendung von Ultraschall-Kriechwellen. Materialprüfung. 1984. B. 26. Nr. 9. S. 323-326.
11. **Krautkrämer J., Krautkrämer H.** Werkstoffprüfung mit Ultraschall. – Berlin – Heidelberg – New York – London – Paris – Tokyo: Springer Verlag. 1986. 752 p.
12. **Schmid R.** Ultrasonic Testing of Austenitic and Dissimilar Metal Welds. NDTnet. 1997, Vol.2. No.12. – <http://www.ndt.net/article/pow1297/schmid1.htm#4214>.
13. **Davis J. M.** Basic wave physics for sizing methods. <http://www.ndt.net/article/1198/davis/davis2.htm>.
14. **Bray D. E.** Current directions of ultrasonic stress measurement techniques. <http://www.ndt.net/article/wendt00/papers/idn774/idn774.htm>.
15. **Zheng Kaisheng, Chen Yucheng.** The development and application of single crystal creeping wave probe with linefocusing – <http://www.ndt.net/article/wendt00/paper/idn039/idn039.htm>.
16. **Викторов В. И.** Типы звуковых поверхностных волн в твердых телах. Акустический журнал. 1979, вып. 1. Т. 25. С. 1-17.
17. **Разыграев Н. П., Ермолов И. Н.** Искатели для контроля приповерхностного слоя головными волнами. Дефектоскопия. 1981. № 1. С. 53-62.
18. Deutsches Patent № 2802278. Verfahren und Anordnung zum Nachweis von oberflächennahen Fehlern bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung / **Wüstenberg H., Erhard A., Möhrle W.** Anm. 19 01 1978. Ausgabetag 15 01 1981.
19. **Басацкая Л. В., Ермолов И. Н.** Теоретическое исследование ультразвуковых продольных подповерхностных волн в твердых средах. Дефектоскопия. 1980. № 7. С. 58-65.
20. **Sajauskas S., Minialga V.** Paviršinių išilginių ir paviršinių skersinių bangų sąveikos su išoriniu kampu eksperimentiniai tyrimai. Ultragaras. 2002. Nr. 1(42). P. 42-45.
21. **Möhler P., Röhrich H.** Rechnergesteuerte Ultraschall-Prüfelektronik zur automatischen Untersuchung von Kernreaktor-Komponenten im Rahmen der Fertigungsprüfung. Materialprüfung. 1983. B. 25. Nr. 3. S. 66-69.
22. **Minialga V., Sajauskas S.** Generation of longitudinal surface acoustic waves by laser pulse. Proceedings of the 5th International Conference on Vibration and Measurements by Laser Technique. Advances and Applications. Ancona. 19-21 June 2002.

S. Sajauskas

### The problem of excitation of longitudinal - surface acoustic waves

#### Summary

The efficient excitation of longitudinal - surface acoustic waves (LSAW; creeping waves) are discussed. By using LSAW for NDT and measurement, it is necessary to eliminate an influence of longitudinal bulk waves. It was shown that the best LSAW probe is a variable angle-beam transducer. Experimentally it was determined that the ratio of 1.8 MHz Rayleigh and LSAW waves amplitudes in aluminium 6063-T6 is 6.8. Laser generated ultrasonic waves have been applied to excitation the LSAW extremely it of short pulses.

Pateikta spaudai 2002 06 10