

# LASERSKI ULTRAZVOČNI DEFEKTOSKOP

R. Hrovatin in J. Možina

**KLJUČNE BESEDE:** ultrazvočni defektoskopi, detekcija ultrazvoka, lasersko vzbujanje ultrazvoka, NdYAG laserji, senzori malih pomikov, Michelsonov interferometer, brezkontaktno merjenje, neporušne preiskave, uporaba laserjev, laserska ultrasonika, eksperimentalne raziskave

**POVZETEK:** V članku je prikazana zgradba in način delovanja dveh sistemov za brezdotično interferometrično detekcijo lasersko generiranih ultrazvočnih pomikov. Odziv obeh sistemov je proporcionalen dejanskim odmikom na površini materiala, z njim pa lahko detektiramo pomike reda velikosti 0.1 nm. V eksperimentalnem delu predstavljamo odzive teh sistemov na lasersko vzbujen ultrazvok pri različnih parametrih, hkrati pa razčlenjujemo vplive na obliko in širjenje ultrazvočnega vala.

## LASER ULTRASONIC DEFECTOSCOPE

**KEY WORDS:** ultrasonic defectoscopes, detection of ultrasound, NdYAG lasers, small displacement sensors, Michelsons interferometer, contactless measurement, nondestructive evaluation, laser application, laser ultrasonics, experimental research

**ABSTRACT:** The construction and the basic operating principles are presented for two interferometric systems for noncontact laser induced ultrasonic displacement measurements. Both system responses are proportional to the displacements on material surface and amplitudes down to the order of magnitude of 0.1 nm can be detected. In this paper experiments with varying excitation parameters are discussed while different effects on the ultrasonic wave shape are analyzed.

### 1. UVOD

Laserske metode vzbujanja in detekcije ultrazvoka v materialih se uveljavljajo pri neporušnem preizkušanju materiala /1,2/, pri določevanju kvalitete površin in materialnih konstant /3,4/, metode detekcije pa lahko uporabimo pri določanju kvalitete laserskih obdelovalnih procesov /5,6/ in kalibraciji senzorjev malih pomikov (mikrofoni, hidrofon) /7/.

Najvažnejša odlika laserskih metod je brezdotičnost postopka, kar nam omogoča njihovo uporabo v težavnih okoljih (radioaktivnost, korozivna okolja, visoke temperature). Poleg tega na stiku med preizkušancem in senzorjem ne prihaja do modulacije valovanj, kar nam zagotavlja direkten vpogled v dogajanje na površini vzorca.

Težave, s katerimi se soočamo pri uporabi teh metod, nastopijo pri vzorcih, kjer je odboj sondirnega žarka slab, pa naj bo to zaradi previsoke absorpcije na preizkušancu, ali pa zaradi prevelike hrapavosti na njegovi površini /8,9/. Poleg tega uporaba laserja zahteva upoštevanje varnostnih predpisov. Nenazadnje je tu še razmeroma visoka cena sistema.

Tovrstni sistemi so sestavljeni iz vzbujevalnega dela, močnostnega pulznega laserskega izvora in sondirnega dela. Ultrazvočne pomike na površinah materialov lahko detektiramo z modulacijo od snovi odbitega žarka. Pri tem izkoriščamo bodisi odklon žarka /4,10/, bodisi tunelski efekt /11/ ali pa interferenco /1,12/.

V tem članku predstavljamo možnosti interferometrične detekcije ultrazvoka z dvema izboljšanima verzijama Michelsonovega interferometra. V eksperimentalnem delu so prikazani odzivi na aluminijastih vzorcih pri različnih parametrih vzbujanja ultrazvoka. Hkrati analiziramo posamezne vplive na širjenje in obliko ultrazvočnih valov.

### 2. PRINCIP DELOVANJA

#### 2.1. Lasersko vzbujanje ultrazvoka v kovinah

Lasersko vzbujanje ultrazvoka temelji na optoakustičnem pojavu, do katerega pride ob interakciji nestacionarnega svetlobnega toka in površine kovine. Mehanizem tega pojava je v grobem naslednji: snov se pri lokalni absorpciji svetlobe segreje in termično raztegne. Nastalo neravnovesno stanje se v obliki mehanskih valov razširi po celotnem vzorcu. Dinamika tega pojava je odvisna od časovnega poteka svetlobnega toka, optičnih in termoelastičnih konstant materiala ter robnih pogojev na meji med absorbirajočo kovino in prozornim okoliškim medijem. Iz množice lasersko vzbujenih valov običajno za analizo uporabimo longitudinalne, transverzalne in nekatere od površinskih valov.

Ultrazvok običajno vzbujamo z laserskimi pulzi. Glavni vpliv na dogajanje na površini in s tem povezan časovni potek ultrazvočnih valov ima intenziteta vpadle laserske svetlobe. Pri nizkih intenzitetah govorimo o termoelas-

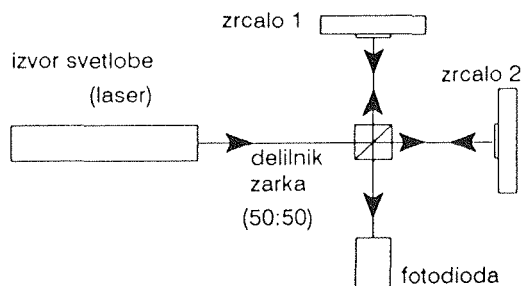
tičnem mehanizmu. Pri tem maksimalne temperature ne dosežejo tališča, zato ekspanzijo lahko dinamično popišemo z linearno teorijo kot termoelastični val /15/. Kvalitativna analiza nam pokaže, da v tem primeru zaradi geometrije toplotnega izvora transverzalni val amplitudno prevlada nad longitudinalnim.

Drugeče pa so razmere pri visokih intenzitetah, kjer pride do odparevanja površinske plasti in do nastanka plazme. Takšen ablativni mehanizem vzbujanja ultrazvoka ima za posledico prevlado longitudinalnega vala, ki ga povzroči odzivna sila, transverzalni val pa spremeni fazo. Teoretično so te razmere težje popisljive, zato se navadno zatekamo k eksperimentalnim rezultatom.

Za defektoskopijo so najugodnejši longitudinalni valovi. Optično jih je možno vzbujati v ozkem območju intenzitet, pri katerih se prispevka k transverzalnemu valu zaradi termične ekspanzije in ablacije medsebojno izničita.

## 2.2. Interferometrski detekcija ultrazvoka

Klasični Michelsonov interferometer za merjenje pomikov (sl. 1) deluje na principu štetja interferenčnih peg, ki se pojavljajo pri spreminjanju optičnih poti v krakih interferometra. Njegova ločljivost je zato omejena na četrtno valovne dolžine svetlobe. Z izboljšanjem številne elektronike je ločljivost možno izboljšati še za faktor 10, vendar tudi to ne zadošča za meritve ultrazvočnih pomikov na površini kovin.



Slika 1: Shema Michelsonovega interferometra

Za takšen interferometer velja, da se intenziteta svetlobe  $I$  na fotodiodi pri spreminjanju dolžine  $x$  enega od krakov spreminja kot

$$I(x) = 4 \cdot \epsilon_0 \cdot c \cdot E_0^2 \cdot \cos^2\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right). \quad (1)$$

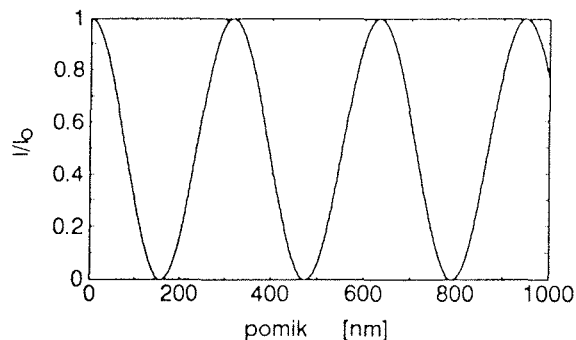
Pri tem je  $\epsilon_0$  influenčna konstanta,  $c$  hitrost svetlobe,  $E_0$  amplituda električnega polja in  $\lambda$  valovna dolžina. Iz enačbe 1 in slike 2 je razvidno, da se s pomikom spreminja tudi občutljivost interferometra  $Z(x)$ , ki jo definiramo kot

$$Z(x) = \frac{dI}{dx} \cdot k = -8 \cdot \epsilon_0 \cdot c \cdot E_0^2 \cdot k \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot \sin\left(\frac{4\pi x}{\lambda}\right), \quad (2)$$

kjer je  $k$  konstanta fotodiode ( $Vm^2/W$ ). Občutljivost je največja pri  $x = \lambda/8 \pm m\lambda/4$ , torej na polovici amplitude

intenzitete (sl.2), če zahtevamo še pozitiven odvod pa pri  $x = 3\lambda/8 \pm m\lambda/2$ , kjer znaša

$$Z_{max} = 8 \cdot \epsilon_0 \cdot c \cdot E_0^2 \cdot k \cdot \frac{\pi}{\lambda} \quad (3)$$



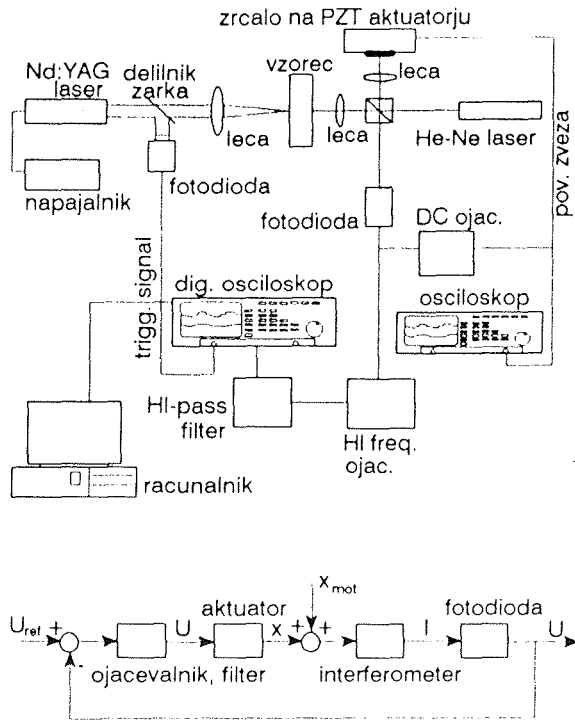
Slika 2: Intenziteta v odvisnosti od razlike dolžin krakov ( $\lambda = 632.8 \mu m$ )

Za meritev zelo majhnih pomikov je potrebno interferometrski sistem nastaviti tako, da visokofrekvenčni ultrazvočni pomik detektiramo takrat, ko je njegova občutljivost največja. Pri tem se je treba izogniti okoliškim motnjam (vibracije, temperaturne fluktuacije), v frekvenčnem območju do 1 kHz. Nalogo je možno rešiti na več načinov, od katerih sta dva podrobneje opisana v nadaljevanju.

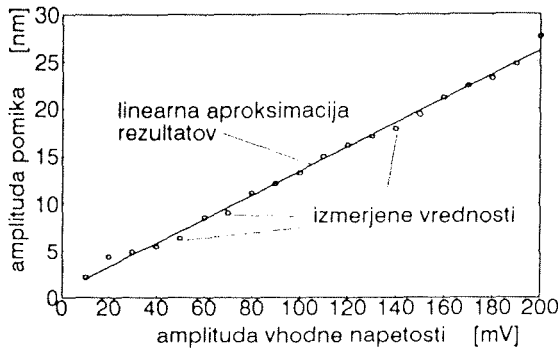
### 2.2.1. Kompenziran Michelsonov interferometer

V praksi se je najprej uveljavil stabiliziran interferometer /12/. Rešitev problema temelji na zaprtem detekcijskem sistemu, ki motnje eliminira s povratno zanko. Če zrcalo v referenčnem kraku Michelsonovega interferometra premikamo v nasprotni smeri motnje okolice, lahko eliminiramo tako temperaturno motnjo kot tudi vibracije. Ker sta motnja in pričakovani signal frekvenčno dobro ločena, z vstavitvijo filtra v povratno zanko dosežemo selektivno eliminacijo zunanje motnje. Frekvenčno območje mehanskih vibracij in temperaturnih fluktuacij sega do približno 1 kHz, medtem ko pričakujemo signal v območju od enega do nekaj deset MHz. Shemo takšnega merilnega sistema predstavlja slika 3.

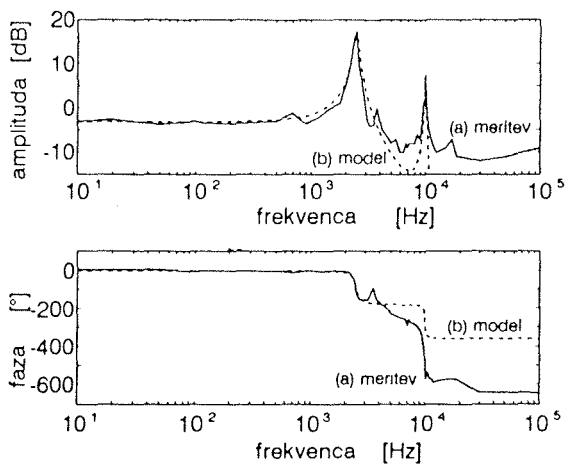
Kot aktuator smo uporabili polovični bimorfni piezoelektrični element, ki izkorišča uklon plošče /13,14/. Na medeninasto ploščo prilepljena piezoelektrična ploščica je radialno polarizirana. S takšnim aktuatorjem je možno doseči pomike prek  $1 \mu m$  v centru ploščice že pri napetostih pod 5V. Meritev linearnosti (sl. 4), je dala zadovoljive rezultate. Meritve frekvenčne karakteristike (sl. 5) pa so pokazale, da aktuator lahko obravnavamo kot dvojni sistem drugega reda. Tej karakteristiki smo prilagodili tudi oblikovanje povratne zveze, ki je sestavljena iz dveh filtrov 1. reda, dveh ojačevalnih stopenj in stopnje za nastavljanje referenčne točke delovanja interferometra.



Slika 3: Sistem s kompenziranim Michelsonovim interferometrom in kibernetska shema stabilizacije interferometra.



Slika 4: Linearnost aktuatorja pri različnih amplitudah vhodne napetosti

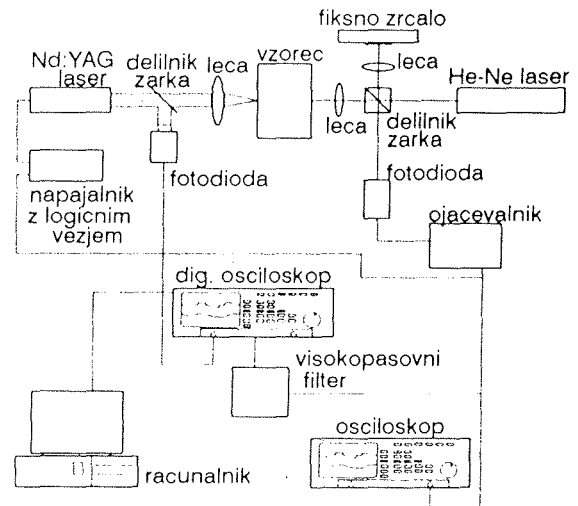


Slika 5: Frekvenčna karakteristika sistema aktuator interferometer-fotodioda: (a) izmerjena karakteristika in (b) sistem modeliran z dvojnim sistemom drugega reda.

### 2.2.2. Sistem s sinhronim proženjem

Drugi način je novost, ki je v literaturi še nismo zasledili, deluje pa na principu kontroliranega proženja vzbujevalnega laserja.

Motnje iz okolice vseskozi premikajo interferometer iz najboljčutljiveše točke, zato se jim z vzbujanjem prilagodimo tako, da ultrazvočni val vzbudimo v trenutku, ko je zaznavnost največja. Signal iz fotodiode vodimo v logično vezje (sl.6) in ko doseže točko maksimalne občutljivosti, sprožimo pulz iz vzbujevalnega laserja. Sama logika tega vezja temelji na vnaprejšnjem predvidevanju položaja interferometra. Predhodno nastavimo dve točki, skozi kateri naj bi potekal signal, povzročeni z okoliško motnjo. Z njima definiramo gradient motnje. Pričakujemo, da bo motnja v naslednjih 140  $\mu$ s, kolikor je potrebno od signala za proženje laserja do laserskega pulza, obdržala takšen naklon. S smiselno postavitvijo obeh točk in nastavitvijo toleranc pri drugi dosežemo, da vzbujevalni laser proži dejansko v trenutku maksimalne občutljivosti.



Slika 6: Interferometerski sistem za detekcijo ultrazvoka s sinhronim proženjem vzbujevalnega laserja.

Ta metoda je vezana na možnost dovolj hitrega kontroliranega vzbujanja ultrazvoka. Za nastavitve sistema je potrebno delno poznavanje motnje. Metoda je dovolj enostavna, tako da jo lahko realiziramo že s preprostim elektronskim vezjem. Nekaj težav nastopi pri velikih motnjah (amplitude nad 160  $\mu$ m), kjer prihaja do prehodov prek enega interferenčnega vrha. Pri vzorčenju signalov s sprotnim povprečenjem zato položaj interferometra nadziramo z dodatnim osciloskopom, tako da ugotovimo takšne prehode.

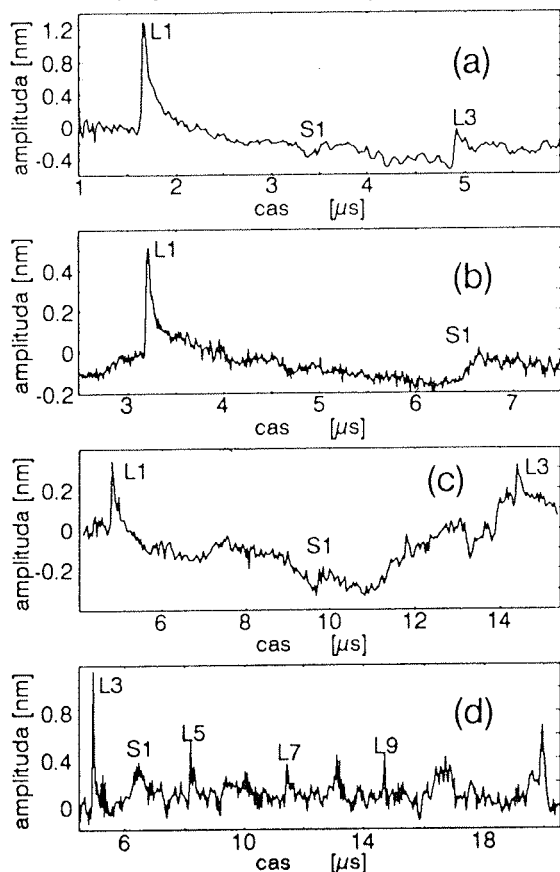
Optično se oba interferometra od klasične postavitve Michelsonovega interferometra razlikujeta po vstavljenih enakih konveksnih lečah v oba kraka, kar nam omogoča lažje justiranje izhodnih žarkov. Pri manjši izvenfokusni poziciji obeh zrcal uporabimo za justiranje koncentrične interferenčne kroge. S tem izgubimo pri-

bližno 20% vidnosti, vendar pa je bistveno olajšano pozicioniranje vzorcev.

Fotodioda na izhodu interferetrov je prirejena tako, da je izhod iz primarnega senzorja (fotodiode) ojačan za faktor od 7 do 50, kar je odvisno od nastavitve potenciometra (trenutno 10), nato se odcepi veja za nizkofrekvenčno povratno zanko, oz. za nadzor nizkofrekvenčne motnje. Visokofrekvenčna veja je filtrirana z visokopasovnim ( $f_m=150\text{ kHz}$ ) filtrom in ojačana s faktorjem 10. Izhodna pasovna širina detektorja je od 150 kHz do 60 MHz, zgornja meja je odvisna od faktorja primarnega ojačanja. Občutljivost za  $1\ \mu\text{W}$  pri 650 nm in skupnem ojačanju 100 znaša 89.6 mV. Skupni šum na izhodu je ocenjen na  $1.7\ \text{mV}_{\text{rms}}$ , kar približno ustreza amplitudi pomika 0.1 nm.

### 3. EKSPERIMENTI

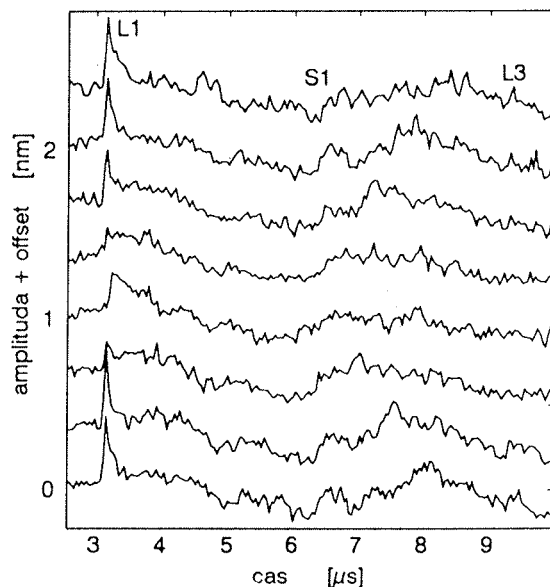
Z opisanimi interferetrovima smo detektirali ultrazvočne valove v aluminijastih vzorcih. Vzbujaali smo jih z NdYAG laserjem, z dolžino pulza 11 ns (FWHM). Energija in s tem intenziteta vpadlega pulza sta se spreminjali. Na sliki 7 so prikazani odzivi interferetrov pri različnih debelinah vzorca in večkratni odboji ultrazvočnega vala v vzorcu, z debelino 10 mm. Energija vzbujevalnega laserja je pri teh eksperimentih znašala 11 mJ, žarek pa je bil fokusiran na površino vzorca. Pri



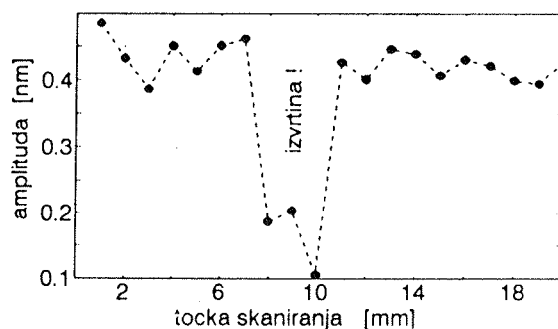
Slika 7: Odzivi interferetrov na vzorcih debeline (a) 10 mm, (b) 20 mm in (c) 30 mm (10 x povprečno), in (d) večkratni odboji longitudinalnega vala na vzorcu debeline 10 mm.

teh pogojih prevladuje ablativni mehanizem generacije ultrazvoka, kjer se del materiala upari. Ugotovili smo linearno odvisnost pozicije ultrazvočnih valov v odvisnosti od debeline vzorca. Hkrati smo opazili tudi upadanje amplitud z večanjem debeline vzorca.

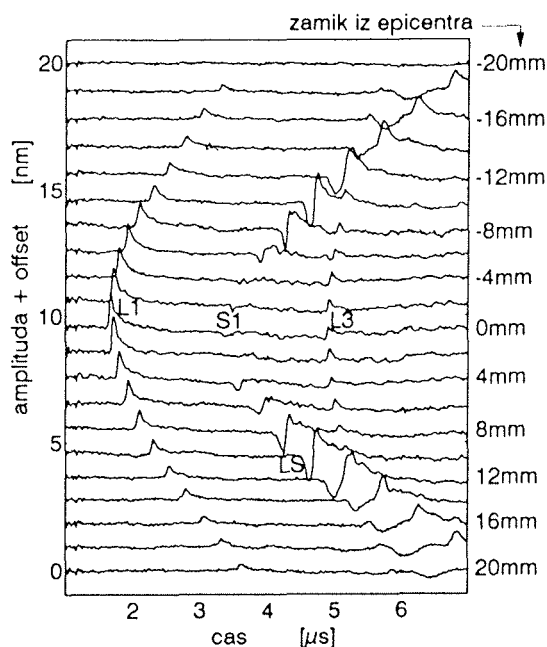
Na širjenje in s tem na obliko ultrazvočnega vala vplivajo možne napake v materialu, po katerem se val širi. Te vplive smo analizirali na vzorcu debeline 20 mm, v katerega smo bočno izvrtali dve luknji s premerom 3 mm. Vzbujanje je bilo v tem primeru enako kot v prvem eksperimentu. Metoda določevanja defekta je enaka kot pri klasični presevalni defektoskopiji, le da gre tu za drugačne vrste vzbujanja in detekcije ultrazvočnih valov. Pri premikanju obeh žarkov prek izvrtine smo opazili znatne spremembe v signalu (sl. 8). Kot merodajno cenilko smo izbrali amplitudo prvega longitudinalnega (L1) vala, katere spreminjanje med skeniranjem je prikazano na sliki 9. Ugotovili smo, da število odzivov z manjšo amplitudo odgovarja dimenziji izvrtine. Na tej osnovi je možno razviti novo metodo določanja lege in dimenzije defektov v notranjosti vzorcev.



Slika 8: Odzivi interferetrov pri premikanju žarkov preko izvrtine. Korak med posameznimi signali je 1 mm.



Slika 9: Spreminjanje amplitude longitudinalnega vala pri premikanju žarkov prek izvrtine.



Slika 10: Spreminjanje ultrazvočnih odzivov pri zamikanju vzbujevalnega in sondirnega žarka.

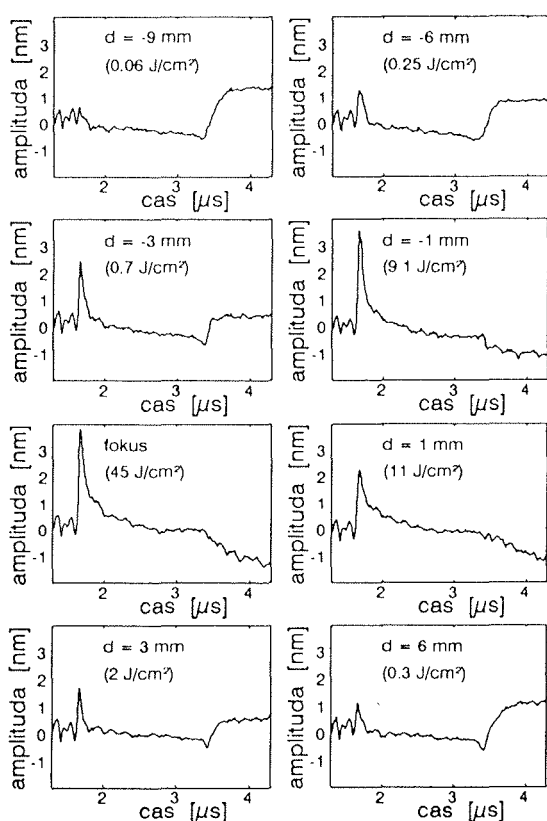
Naslednji vpliv na obliko odziva je posledica detekcije vala izven epicentra vzbujanja. Eksperimente za analizo tega vpliva smo opravili na vzorcu debeline 10 mm, tako da smo izvor ultrazvočnega pulza premikali glede na točko detekcije ultrazvoka. Odzivi so prikazani na sliki 10. Opazimo spreminjanje pozicije posameznih valov, zaradi spremenjenih poti. Poleg tega se med longitudinalnim (L1) in transverzalnim (S1) valom pojavi še takoi-menovani čelni val. To je strižni val, ki nastane pri širjenju longitudinalnega vala po površini /15/ in se od začetnega strižnega vala odlepi pri kritičnem kotu:

$$\sin \theta_c = \frac{C_S}{C_L} \tag{4}$$

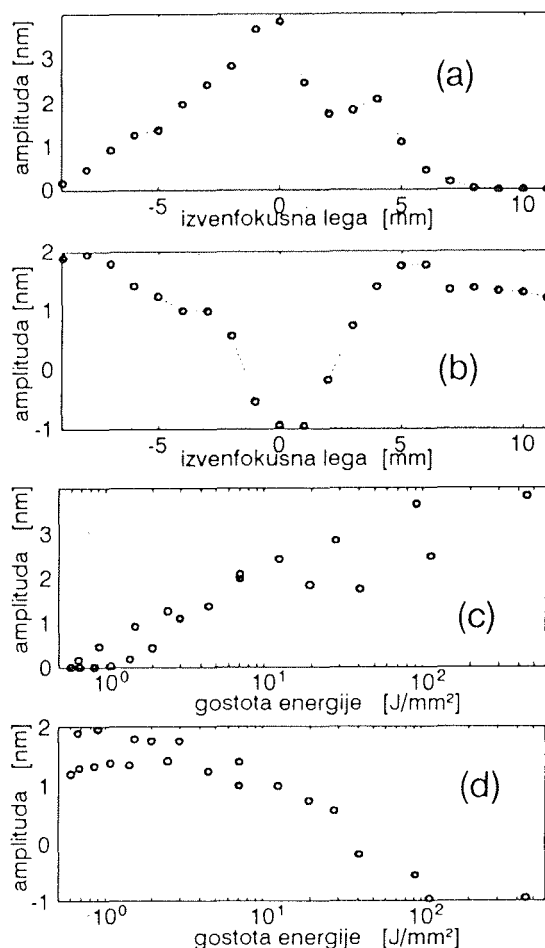
$C_S$  ... hitrost širjenja transverzalnega vala  
 $C_L$  ... hitrost širjenja longitudinalnega vala

Časovna razlika med strižnim in čelnim valom je pri tem eksperimentu majhna, njuno ločevanje pa otežuje še površinski val, ki se pojavi pri konverziji longitudinalnega vala ob odboju na zadnji površini.

Pomemben vpliv na obliko ultrazvočnega vala ima mehanizem vzbujanja ultrazvoka. Pri termoelastičnem



Slika 11: Odzivi interferometra pri različnih intenzitetah vpadle svetlobe. Ob posameznih primerih navajamo izvenfokusno razdaljo, v oklepaju pa gostoto energije vzbujevalnega žarka.



Slika 12: Spreminjanje amplitude (a) longitudinalnega vala in (b) transverzalnega vala v odvisnosti od izvenfokusne lege vzorca, ter odvisnosti (c) longitudinalnega in (d) transverzalnega vala od intenzitete vzbujevalnega žarka.

vzbujanju se material lokalno hitro segreje brez faznih sprememb. To ima za posledico ekspanzijo predvsem v radialni smeri. Longitudinalni val tako predstavlja zažemek, ki se pojavi ob ekspanziji in je orientiran nasprotno smeri širjenja. Ablativni mehanizem generacije ultrazvoka pa temelji na uparjanju materiala in pojavu plazme. Zaradi mehanske odzivne sile je longitudinalni val močnejši in pozitivno orientiran. Vpliv obeh mehanizmov je možno spreminjati s premikanjem goriščne ravnine glede na površino vzorca. Pri tem se spreminja tudi prerez vzbujevalnega laserskega žarka. Uporabili smo lečo z goriščno razdaljo 25 mm, povprečna energija vzbujevalnih pulzov pa je znašala 18 mJ. Nekaj odzivov je prikazanih na sliki 11. Spreminjanje amplitud longitudinalnega in strižnega vala ter njuno odvisnost od intenzitete ponazarja slika 12. Sipanje v zadnjem diagramu je posledica nenatančnosti določanja površine vpadlega žarka. V bližini gorišča opazimo naglo povečanje amplitude longitudinalnega vala in zmanjšanje amplitude transverzalnega vala. Opisani pojav je razen v defektoskopiji možno s pridom uporabiti pri nadzoru pulzних laserskih obdelovalnih procesov /5/.

#### 4. ZAKLJUČKI

V prispevku je predstavljen razvoj dveh sistemov za detekcijo ultrazvoka. V začetku navajamo teoretične osnove interferometrične detekcije, v nadaljevanju pa je opisana eksperimentalna postavitev sistema s kompenziranim Michelsonovim interferometrom in sistema s krmiljenim proženjem vzbujevalnega laserja.

Z obema sistemoma je možno vzbujati in detektirati ultrazvočne pomike na kovinskih vzorcih. Sistema predstavlja novost, ki se uspešno kosa z metodami konvencionalne detekcije ultrazvoka. V marsičem jih celo prekaša, saj neposredno detektira odmik površine v normalni smeri. Njuna frekvenčna karakteristika zagotavlja informacijo o odmikih brez popačenj zaradi prenosne funkcije sistema. Amplitudno sta dovolj občutljiva, kar smo pokazali v eksperimentalnem delu, kjer prikazujemo odzive sistema na pomike reda velikosti do 0.1 nm. Tako lahko detektiramo pomik vala, ki smo ga na prednji strani 10 mm debele aluminijaste plošče vzbudili z laserskim pulzom, potem pa se je še devetkrat odbil od stene. Pri vsakem odboju val izgubi približno 10% amplitude, ki se v odvisnosti od poti dodatno zmanjšuje približno s kvadratom poti.

Uporabnost sistema pri defektoskopskih preiskavah je razvidna iz predstavljenih odzivov na ultrazvočne pomike, ki so se širili skozi umetno poškodovan material.

Defekte smo simulirali z izvrtinami, v tem prispevku pa prikazujemo le odzive pri premikanju vzbujevalnega in sondirnega žarka prek takega defekta. V prispevku so prikazani še vplivi debeline vzorca, zamaknitve točke vzbujanja in točke detekcije in vpliv vzbujevalnega mehanizma ultrazvočnih valov na njihovo širjenje in časovni potek.

Odlike predstavljenih sistemov se pokažejo v razmerah, ki so neugodne za klasične metode. To so agresivna atmosfera, temperaturno obremenjeni vzorci in radioaktivno okolje.

#### 5. LITERATURA

1. R. Hrovatin, J. Možina; Brezdotično vzbujanje in detekcija ultrazvoka, Jugosl. društvo za NDT, Ljubljana 1990
2. C.B. Scruby; Ultrasonics, Vol. 27, p 195, 1989
3. R.J. Dewhurst, A.D.W. McKie, S.B. Palmer; Appl.Phys.Lett., Vol. 49, p 1694, 1986
4. R. Hrovatin, J. Možina; J. Appl.Phys., Vol. 71, p 6192, 1992
5. J. Možina; Robotics & Computer Integrated Manufacturing, Vol. 4, p 233, 1988
6. G. Chryssolouris; Laser Machining, Springer-Verlag, New York, 1991
7. R. Reibold, W. Molkenstruck; Ultrasonics, Vol.25, p 114, 1987
8. J.W. Wagner, J.B. Spicer; J. Opt.Soc.Am.B, Vol. 4, p 1316, 1987
9. J.D. Aussel, J.P. Monchlain; J. Appl.Phys, Vol. 65, p 2918, 1989
10. H. Sontag, A. Tam; Appl.Phys.Lett., Vol. 46, p 725, 1985 11. D. Horvat; Optična ultrasonika, 1. podipl. sem., FS, Ljubljana 1990
12. C.H. Palmer, R.E. Green; Appl.Opt., Vol. 16, p 2333, 1977
13. D. Horvat; Akustični pretvornik v plinu, diplomska naloga, FNT, Ljubljana 1989
14. M. Modic, M. Kosec, J. Pirš, J. Možina; Informacije MIDEM, Letnik 21, št. 2, Ljubljana 1991
15. J.D. Aussel, A. le Brun, J.C. Baboux; Ultrasonics, Vol. 26, p 245, 1988

*Rok Hrovatin, dipl.ing.  
prof.dr. Janez Možina  
Univerza v Ljubljani,  
Fakulteta za strojništvo  
Murnikova 2  
61000 Ljubljana*

**Prispelo: 20.08.92**

**Sprejeto: 08.09.92**