

UDK 620.179.16:534.142.5

Detekcija ultrazvočnih pomikov velikosti 10^{-11} m

IGOR GRABEC

UVOD

Znan pojav mehansko obremenjene snovi je po-kanje, ki nakazuje bližajočo se porušitev in je zato uporaben v tehniki preizkušanja trdnosti materialov in naprav. V prejšnjih člankih smo opisali, kako lahko z detekcijo akustične emisije kakovostno označimo pogostost in lego nastajanja mikrorazpok [1, 2]. V tem članku pa bomo opisali delo pri razvoju instrumentarija, ki naj bi omogočil tudi količinsko označiti ustrezne mikropoškodbe. Če želimo z akustično emisijo dobiti količinske podatke, moramo najprej s kalibriranim senzorjem detektirati emitirani zvok, nato pa iz izmerjenega signala na osnovi primerne fizikalnega modela določiti lastnosti izvora oziroma ustreznega defekta. Prvi del te naloge je splošno eksperimentalen in je vezan na razvoj absolutno kalibriranih detektorjev akustične emisije, ki še niso komercialno dostopni. Drugi del naloge pa je bolj teoretičen in je specifičen za posamezni primer, zato se bomo v tem članku omejili predvsem na obravnavo eksperimentalne problematike.

Osnovna prednost akustične emisije pred drugimi pojavi, ki jih uporabljamo pri neporušnih preiskavah je ta, da omogoča detekcijo razvoja mikronestabilnosti, ki spremljajo začetek procesa rušenja. Ustrezni zvočni signali so zato zelo šibki in segajo s svojim spektralnim sestavom visoko v ultrazvočno področje. Za neporušne preiskave zanimiva akustična emisija v konstrukcijskih jeklih in kompozitnih materialih je na primer označena s pomiki amplitude okoli 10^{-10} m v frekvenčnem območju od 100 kHz do 10 MHz. Zaradi tako nizkih amplitud so se doslej za detekcijo akustične emisije uporabljali piezoelektrični resonančni senzorji. Neugodna lastnost teh senzorjev je, da njihov izhodni signal ni sorazmeren s pomikom površine. Poleg tega so piezoelektrični senzorji običajno samo relativno kalibrirani, na njihovo občutljivost pa vpliva tudi način sklopitve z opazovano snovjo. Rezultate meritev s piezoelektričnimi senzorji lahko razlagamo zato predvsem kakovostno. Zaradi tega se je na področju raziskav akustične emisije pojavila potreba po absolutno kalibriranem brezkontaktnem širokopasovnem senzorju ultrazvočnih pomikov. Za ta namen sta bila doslej razvita kapacitivni [3] in optični interferometrični senzor [4], pri čemer je kapacitivni bistveno preprostejši in tudi bolj uporaben. Namen našega članka je opisati konstrukcijo in delovanje kapacitivnega senzorja za merjenje ultrazvočnih pomikov, ki smo ga s pomočjo sodelavcev iz Saturnusa razvili na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani. Z eksperimentalnimi primeri bomo nato prikazali, kako lahko takšen sen-

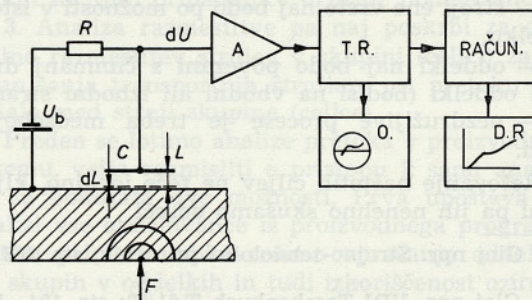
zor uporabljamo za karakterizacijo nekaterih impulznih virov ultrazvoka, ki so uporabni za kalibracijo piezoelektričnih senzorjev.

DELOVANJE IN KONSTRUKCIJA KAPACITIVNEGA SENZORJA

Kapacitivni senzor je nabit ploščni kondenzator, pri katerem se širina zračne reže spreminja zaradi premikanja ene plošče [5]. Shematično je prikazan na sliki 1 skupaj z ustreznim električnim vezjem za merjenje pomikov. Na senzor s kapaciteto C je prek visokohmskega upora R pripeljana enosmerna baterijska napetost U_b . Hitra sprememba razmika med ploščama povzroči spremembo kapacitete in ob praktično konstantnem naboju tudi spremembo napetosti na kondenzatorju. Fluktuacija napetosti se nato ojači v ojačevalniku A tako, da je primerna za opazovanje na osciloskopu in registriranje. Iz enačbe, ki veže napetost in naboj s kapaciteto kondenzatorja, izhaja ob predpostavki, da je naboj praktično konstanten, povezava med fluktuacijo napetosti dU in razmakom med ploščama dL :

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{LQ}{\epsilon_0 S} \Rightarrow \frac{dU}{U_b} = \frac{dL}{L} \quad (1)$$

Pri tem smo z L in S označili razmik in površino plošč, z U in Q napetost in naboj, z ϵ_0 pa influenčno konstanto. Izraz (1) kaže, da lahko pri določeni napetostni občutljivosti električnih instrumentov merimo s kapacitivnim senzorjem tem manjše pomike, čim manjši je razmik med ploščama L . Vendar tega razmika ne moremo poljubno zmanjševati zaradi neravnosti in hrapavosti plošč ter težav z vzporedno nastavitvijo plošč. Za normalne laboratorijske razmere je smiselno uporabljati razmik nekje v območju od 1 do 10 μm . Iz enačbe (1) se nadalje vidi, da je fluktuacija nape-



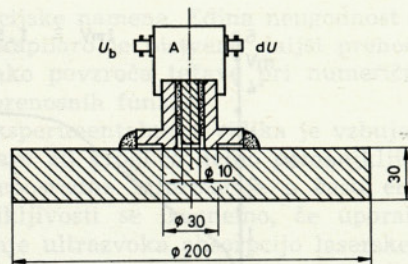
Sl. 1. Shema kapacitivnega senzorja pomikov in pripadajoče električno vezje

C — senzor, A — ojačevalnik, T.R. — transientni rekorder, Račun. — računalnik, O — osciloskop, D.R. — digitalni rekorder

tosti pri določeni fluktuaciji razmika sorazmerna z baterijsko napetostjo. Zaradi možnosti električnega preboja v reži te napetosti ne moremo poljubno dvigniti. Iz prebojnih lastnosti zraka izhaja [3], da mora biti napetost na kondenzatorju približno 35 V pri reži $1 \mu\text{m}$. Ta meja se z razmikom plošč proporcionalno veča, toda občutljivost senzorja zaradi nje ne more preseči vrednosti $35 \text{ V}/\mu\text{m}$. Ocena najmanjših vrednosti pomikov, ki jih lahko detektiramo s kapacitivnim senzorjem, je nadalje odvisna od najmanjše fluktuacije napetosti, ki jo lahko izmerimo. Pri komercialno nabavljivih integriranih ojačevalnikih za frekvenčno območje od 100 kHz do 10 MHz, ki je zanimivo za akustično emisijo, je nivo šuma glede na vhod ojačevalnika navadno okoli $5 \mu\text{V}$. Ob največji občutljivosti senzorja ustrezajo temu nivoju šuma pomiki $dL = 0,2 \cdot 10^{-12} \text{ m}$. Ta meja se pri realni izvedbi dvigne za kak red velikosti zaradi nižje napetosti na kondenzatorju in povečanega šuma zaradi radioelektričnih motenj. Začetek merskega območja kapacitivnega senzorja se s tem približa velikostnemu razredu 10^{-11} m .

Pri senzorju pomika je ugodno, če imamo premer tipala pomika zanemarljivo majhen. Pri kapacitivnem senzorju to ni mogoče. Raztresene kapacitivnosti veznih žic in vhoda v ojačevalnik znašajo že pri skrbni izvedbi nekaj deset pF, kar zmanjšuje občutljivost senzorja zaradi raztrosa naboja. Glede na občutljivost je zato ugodno imeti čimvečje plošče, vendar gre to na račun neugodnih frekvenčnih lastnosti. Zamislimo si, da imamo v globini h na osi plošče točkovni izvor zvoka, iz katerega se širi krogelni val. Val prispe do sredine senzorja prej kakor do robov, zato se tudi pri ostrem valovnem čelu odziv senzorja razvleče tem bolj, čim večja je dimenzija plošč. Na odziv senzorja vpliva tako le povprečje prek karakterističnega časa zakasnitve, kar zmanjšuje občutljivost senzorja z naraščanjem frekvence opazovanega vala. Ta efekt je še izrazitejši pri legi izvora zunaj osi. Če želimo zadovoljivo označiti pojave v frekvenčnem območju do 10 MHz v primeru, ko je izvor nekaj centrimetrov globoko v jekleni plošči, lahko izberemo polmer plošč le nekaj mm. S tem dosežemo kapacitivnost senzorja reda velikosti 100 pF.

Spodnja meja frekvenčnega območja senzorja je določena s karakterističnim časom $t = R \cdot C$ praznjenja kondenzatorja prek upora ter z mehansko sklopitvijo obeh točk. Če želimo zanesljivo meriti v frekvenčnem območju nad 100 kHz, mora biti red velikosti napajalnega upora in s tem tudi vhodna impedanca ojačevalnika nad $1 \text{ M}\Omega$. Teže je predvideti in preveriti lastnosti mehanske sklopitve. Zaradi nihanja okolja morata biti plošči mehansko sklopljeni tako, da se pri nizkofrekvenčnih mehanskih tresljajih gibljeta skupaj, medtem ko se pri ultrazvočnih nihanjih giblje le ena od plošč. Ta problem rešimo s konstrukcijo tako, da potuje



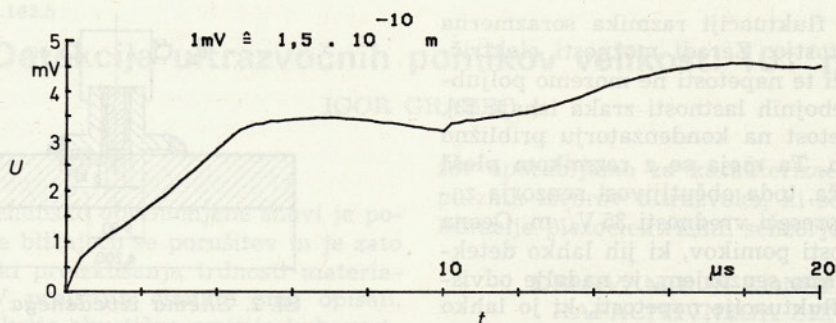
Sl. 2. Shema izvedenega senzorja

ultrazvok od izvora do referenčne plošče po daljši poti, na kateri se tudi izdatno duši, medtem ko potuje do druge plošče nemoteno.

Po navedenih zahtevah smo naredili senzor, kakor prikazuje slika 2. Na sredini kaljene jeklene plošče s premerom 200 mm in debelino 30 mm je na premeru 30 mm površina zbrušena in zlepana. Na površino plošče je prilepljen jeklen valj s premičnim, aksialno nameščenim sornikom. Sornik ima premer 10 mm, od valja pa ga loči plast ležajne plastične mase. Valj in sornik sta bila hkrati čelno zbrušena in zlepana, sornik pa je bil nato navznoter premaknjen za približno $8 \mu\text{m}$. Plast ležajne mase rabi hkrati kot električni in ultrazvočni izolator. Neravnosti in hrapavosti lepanih površin so manjše od $0,1 \mu\text{m}$. Na valj s sornikom je pritrjen aluminijast okrov predojačevalnika, ki pa je hkrati namenjen tudi za zaščito proti zunanjim elektromagnetnim motnjam. Na sornik je prek upora $5 \text{ M}\Omega$ pripeljana baterijska napetost 100 V. Izmenični signal iz sornika je prek kondenzatorja 5000 pF pripeljan na vhod širokopasovnega predojačevalnika z vhodno upornostjo nad $5 \text{ M}\Omega$. Izmerjena kapacitivnost med ploščo in sornikom je 90 pF, raztresena kapacitivnost zaradi žic in okrova pa 80 pF. Temu ustrezni razmik plošč je $L = 7,7 \mu\text{m}$, občutljivost kapacitivnega senzorja pa $dL/dU = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ m/V}$ glede na napetost na sorniku. Nivo šuma senzorja, zmontiranega skupaj s predojačevalnikom, je pod $100 \mu\text{V}$, tako da je mogoče s senzorjem detektirati ultrazvočne pomike velikosti 10^{-11} m .

KARAKTERIZACIJA IZVOROV ULTRAZVOKA

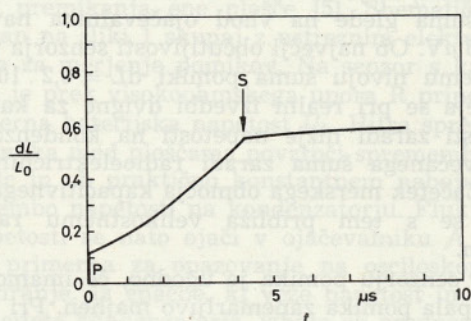
Končni cilj kalibracije senzorja akustične emisije je absolutno izmeriti prenosno funkcijo, ki opisuje pretvorbo ultrazvočnega v električni signal. Za ta namen je potreben absolutno kalibrirani ponovljivi izvor ultrazvoka. Vzbujanje ultrazvoka s piezoelektričnimi pretvorniki za ta namen ni najbolj primerno, ker je potek emitiranega signala navadno precej zamotan in ni neposredno opredeljen z vzbujevalnim signalom. Za potrebe absolutne kalibracije želimo imeti impulzni izvor, katerega lastnost lahko opredelimo neposredno z merjenjem mehanskih veličin in pri katerem ima emitirani signal preprosto strukturo. Raziskave so po-



Sl. 3. Časovna odvisnost pomika plošče v epicentru za primer zloma kapilare

kazale [6, 7], da ustrezajo tem zahtevam pojavi, kakršni so zlom tankih kapilar, elastični trki majhnih krogel ipd. Z namenom, da preverimo delovanje kapacitivnega senzorja, smo posneli ojačane signale iz omenjenih izvorov. Za posnemanje posameznega prehodnega pojava smo uporabili transientni rekorder Data-lab. 905, povezan z osciloskopom, računalnikom HP 9845 B in digitalnim rekorderjem HP 7225 A. Pred meritvami smo najprej posneli impulzno prenosno funkcijo elektronskega ojačevalnega dela instrumentarija, ki smo jo nato pri meritvah ultrazvočnih signalov upoštevali računsko. Kot rezultat smo dobili posnetke fluktuacije napetosti na kapacitivnem senzorju, ki je sorazmerna s pomikom plošče.

Oglejmo si najprej primer, ko je emisija zvoka povzročena z zlomom steklene kapilare z notranjim in zunanjim premerom 0,05 ter 0,08 mm! Kapilara je ležala nasproti senzorja na prosti površini plošče. V smeri osi plošče smo nanjo pritiskali z ovalno konico dinamometra. Pri sili približno 3 N se je kapilara zlomila. Hitrost napredovanja zloma po krhki kapilari je približno enaka hitrosti zvoka v steklu, ki je reda velikosti 10^3 m/s. Čas preloma kapilare je zato reda velikosti $0,1 \mu\text{s}$. Razbremenitev podlage spremlja nastanek elastičnega prehodnega vala, ki se širi proti drugi strani plošče. Potek izmerjenega odmika druge površine plošče v odvisnosti od časa prikazuje slika 3. Na posnetku je le tisti del signala, ki popisuje začetek prehodnega pojava. Ta del je za razlago najzanimivejši, ker ima preprosto strukturo, določeno s prihodom longitudinalne in transversalne komponente ultrazvočnega vala. Preostali del, ki je posledica večkratnih odbojev valov na mejah plošče in površinskih valov, ima zapleteno strukturo in ni uporaben za razlago. Prvič se odbiti val pojavlja pri $10 \mu\text{s}$. Čas potovanja longitudinalne komponente preko 3 cm debele plošče pa je $5 \mu\text{s}$. Zanimivo je, da se izmerjeni signal dokaj dobro ujema s teoretično napovedanim pomikom za stopničasto razbremenitev točkovno obremenjene elastične snovi, ki ga prikazuje slika 4 [8]. Na tej sliki je s P in S označen prihod longitudinalne in strižne komponente emitiranega elastičnega vala. Najbolj opazno odstopanje je v hitro spreminjajočem se delu na začetku



Sl. 4. Teoretično izračunana časovna odvisnost pomika za izbrani primer plošče [8]

P in S označujeta prihod longitudinalne in transversalne komponente vala. Nadalje je $L_0 = F/\pi DG$, F — sila, D — debelina plošče in G — strižni modul snovi

prehodnega pojava. To odstopanje je posledica končnega časa naraščanja odzivne funkcije senzorja in ojačevalnika ter končnega časa lomljenja kapilare. Groba ocena za karakteristični čas odziva celotnega sistema je približno $0,5 \mu\text{s}$, kar dobro ustreza zahtevam pri kalibraciji senzorjev akustične emisije. Podoben signal, kakor pri zlomu kapilare, dobimo tudi pri zlomu grafitne mine za svinčnik, le da je zaradi njene debeline prehodni čas nekajkrat daljši.

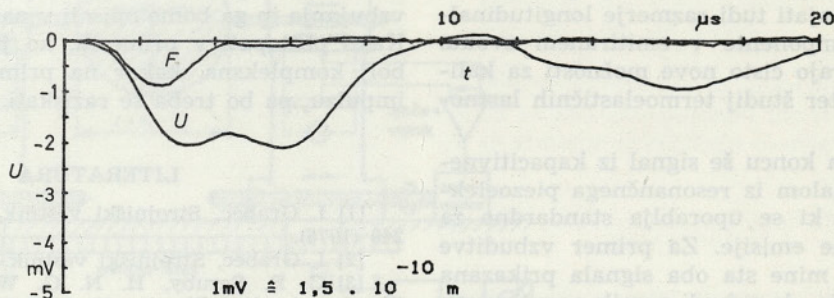
Razmeroma dobro ujemanje teoretično napovedanega signala z eksperimentalno izmerjenim kaže, da lahko kapacitivni senzor res uporabimo za neposredno detekcijo ultrazvočnih pomikov pri pojavu akustične emisije. To ujemanje pa tudi kaže, da je zlom kapilare kratkotrajen prehodni pojav, ki ga lahko opišemo s stopničasto odvisnostjo vzbujevalne sile od časa. Glede na praktično zanemarljive dimenzije kapilare lahko obravnavamo tak izvor tudi kot točkoven. Tako imamo na voljo absolutno umerjeni merilnik pomikov ter časovno in krajevno dobro opredeljen izvor ultrazvoka, ki ga lahko označimo samo z merjenjem sile, časa in lege. To sta najpotrebnejša pripomočka za absolutno kalibracijo senzorjev in instrumentarija akustične emisije. (Ustrezne teoretične in eksperimentalne postopke pa bomo opisali v prihodnjem članku.)

Lom je na splošno slabo ponovljiv pojav. Pri steklenih kapilarah in grafitnih konicah smo ugo-

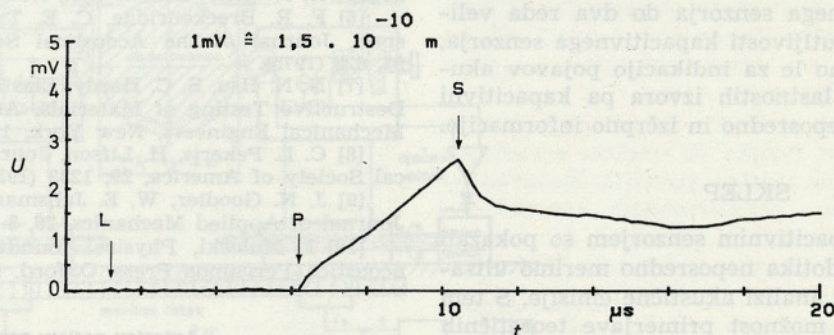
točili statističen raztros porušne sile in s tem amplitude pomikov za približno 25 %. Kljub temu, da lahko porušno silo izmerimo vsakič ponovno, pa bi bilo za potrebe kalibracije ugodneje imeti bolj ponovljiv izvor. Kot najbolj preprost, dobro ponovljiv impulzni izvor ultrazvoka lahko uporabimo udarec majhne jeklene ležajne kroglice, ki pade z določene višine na ploščo. Statistični raztros amplitude izmerjenih ultrazvočnih signalov je v tem primeru le nekaj odstotkov. Slika 5 prikazuje izmerjeni potek odmika površine v odvisnosti od časa za padec jeklene kroglice s premerom 1 mm z višine 100 mm. Če vzamemo, da je čas prehoda pri zlomu kapilare zanemarljivo majhen, smo na osnovi signalov, posnetih pri zlomu kapilare in padcu kroglice, izračunali časovni potek sile pri padcu kroglice. Rezultat, ki ga kaže krivulja F na sliki 5, se dobro ujema z rezultati drugih eksperimentov [7, 9]. Potek sile je glede na največjo vrednost precej simetričen, kar kaže, da kompresijski proces približno ustreza dekompresijskemu, oziroma da je trk dokaj elastičen. Kroglica se po trku res odbije do približno 90 % začetne višine. To ustreza oddani energiji približno $0,4 \cdot 10^{-6}$ J. Karakteristični čas trka je približno $3,5 \mu\text{s}$, povprečna sila pa je približno enaka kakor pri zlomu kapilare, ki je približno 3 N. Ta vrednost se dobro ujema z vrednostjo povprečne sile, ki jo izračunamo iz hitrosti in mase kroglice ter časa trka. Zaradi dobre ponovljivosti in možnosti preproste spremembe parametrov je pojav trka zelo primeren za

kalibracijske namene. Edina neugodnost v primerjavi s kapilaro je bistveno daljši prehodni pojav, kar lahko povzroča težave pri numeričnem določanju prenosnih funkcij.

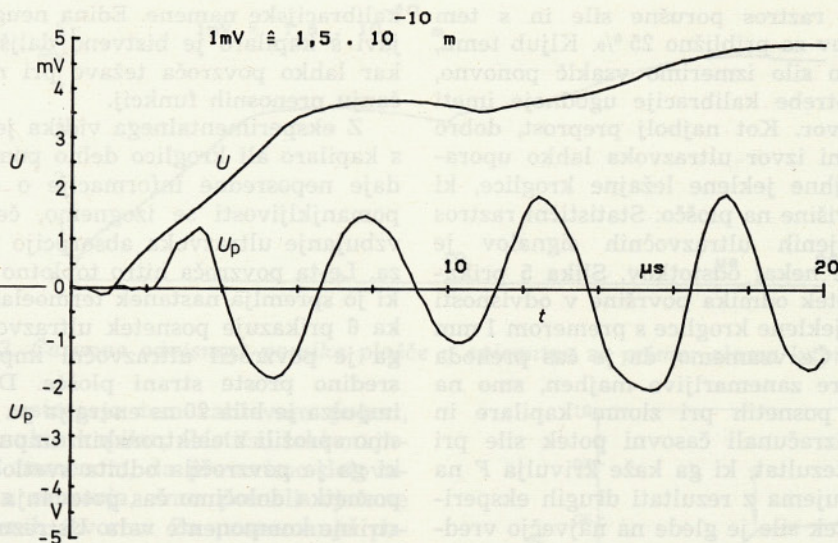
Z eksperimentalnega vidika je vzbujanje zvoka s kapilaro ali kroglico delno pomanjkljivo, ker ne daje neposredne informacije o času emisije. Tej pomanjkljivosti se izognemo, če uporabljamo za vzbujanje ultrazvoka absorpcijo laserskega impulza. Le-ta povzroča hitro toplotno ekspanzijo snovi, ki jo spremlja nastanek termoelastičnega vala. Slika 6 prikazuje posnetek ultrazvočnega pomika, ki ga je povzročil ultrazvočni impulz, usmerjen na sredino proste strani plošče. Dolžina laserskega impulza je bila 20 ns energija pa 0,1 J. Posnemanje smo sprožili z elektronskim impulzom iz fotodiode, ki ga je povzročila odbita svetloba. Tako lahko iz posnetka določimo čas potovanja longitudinalne in strižne komponente vala. Ustrezni hitrosti sta $v_l = 6,0 \cdot 10^3$ m/s, $v_t = 3,1 \cdot 10^3$ m/s in se dobro ujemata s podatki za jeklo. Sliki 4 in 6 kažeta, da se pomika, povzročena z lomom kapilare in absorpcije laserskega impulza, do prihoda strižne komponente precej ujemata. Zato lahko sklepamo, da je ustrezna toplotna ekspanzija glede na longitudinalno komponento pomika precej podobna razbremenitvi pri zlomu kapilare. Po prihodu strižne komponente pa se pojavi v poteku pomika razlika, ki nam je še ni uspelo razložiti, ker model generacije termoelastičnega vala z absorpcijo laserskega impulza še ni teoretično dodelan. Ne glede na to pomanjkljivost



Sl. 5. Časovna odvisnost izmerjenega pomika U in izračunane sile F za primer vzbujanja z udarcem kroglice
En deleč skale ustreza sili 3 N



Sl. 6. Časovna odvisnost pomika v primeru vzbujanja z laserskim impulzom
L, P, S označujejo prihode laserskega impulza, longitudinalne in transverzalne komponente vala



Sl. 7. Časovna odvisnost pomika U , izmerjena s kapacitivnim senzorjem, za primer vzbujaanja z zlomom grafitne mine

U_p opisuje signal iz piezoelektričnega senzorja z resonančno frekvenco 200 kHz pri ojačanju 2000

je vzbujaanje z laserskim impulzom za kalibracijske potrebe zelo primerno, ker brez težav dosežemo zanemarljivo majhen statističen raztros pri ponovitvah preizkusov. To omogoča elektronska kontrola moči laserskega impulza. Poleg tega, da lahko z uporabo laserskega impulza izmerimo hitrost elastičnih valov, je mogoče z različno pripravljenimi površinami spreminjati tudi razmerje longitudinalne in strižne komponente v emitiranem zvoku. S tem pa se odpirajo čisto nove možnosti za kalibracijo senzorjev ter študij termoelastičnih lastnosti površin.

Primerjajmo na koncu še signal iz kapacitivnega senzorja s signalom iz resonančnega piezoelektričnega senzorja, ki se uporablja standardno za detekcijo akustične emisije. Za primer vzbuditve z lomom grafitne mine sta oba signala prikazana na sliki 7. Očitno je, da vzbudi pomik površine resonančno nihanje piezoelektričnega senzorja, tako da iz izhodnega signala ne moremo preprosto sklepati o gibanju površine. Čeprav je lahko občutljivost piezoelektričnega senzorja do dva reda velikosti večja od občutljivosti kapacitivnega senzorja, rabi lahko pretežno le za indikacijo pojavov akustične emisije. O lastnostih izvora pa kapacitivni senzor daje bolj neposredno in izčrpno informacijo.

SKLEP

Preizkusi s kapacitivnim senzorjem so pokazali možnost, da brez dotika neposredno merimo ultrazvočne pomike pri analizi akustične emisije. S tem se je odprla tudi možnost primerjave teoretičnih in eksperimentalnih izsledkov, kar pomeni trdno osnovo za napredek pri raziskavah akustične emi-

sije. Študij emisijskega pojava pri zlomu kapilare, grafitne mine in udarcu kroglice je pokazal, da lahko uporabljamo zlom kapilare kot referenčni pojav, ki omogoča, da lahko izračunamo potek vzbujevalne sile pri drugem pojavu in s tem označimo izvor. (Ustrezni matematični postopek smo doslej izdelali le za primere točkovnega, enosnega načina vzbujaanja in ga bomo opisali v naslednjem članku.) Kako postopati v primerih, ko je narava izvorov bolj kompleksna, kakor na primer pri laserskem impulzu, pa bo treba še raziskati.

LITERATURA

- [1] I. Grabec, Strojniški vestnik, **21**, 41, (1975); **22**, 249 (1976).
- [2] I. Grabec, Strojniški vestnik, **24**, 41, (1978).
- [3] C. B. Scruby, H. N. G. Wadley, Journal of Physics: Applied Physics, **11**, 1487 (1979).
- [4] C. H. Palmer, R. E. Green Jr., Applied Optics **16**, 2333 (1977).
- [5] L. E. Kinsler, A. R. Frey, Fundamentals of acoustics, J. Wiley & Sons Inc., New York, 1962, 298.
- [6] F. R. Breckenridge, C. E. Tschiegg, M. Greenspan, Journal of the Acoustical Society of America, **57**, 626 (1975).
- [7] N. N. Hsu, S. C. Hardy, Elastic Waves and Non-Destructive Testing of Materials, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1978, Vol. **29**, 85.
- [8] C. L. Pekeris, H. Lifson, Journal of the Acoustical Society of America, **29**, 1233 (1957).
- [9] J. N. Goodier, W. E. Jahsman, E. A. Ripperger, Journal of Applied Mechanics, **26**, 3 (1959).
- [10] I. Malecki, Physical foundations of technical acoustics, Pergamon Press, Oxford, 1969, str. 82.

Avtorjev naslov: prof. dr. Igor Grabec,
Fakulteta za strojništvo
Ljubljana