

# PRIMENA INTEGRISANIH SISTEMA ZA OCENU STANJA SLOŽENIH STRUKTURA

Jovičić S. *Stevan*, Mićović M. *Aleksandar*,  
Vojska Srbije, Tehnički opitni centar, Beograd

OBLAST: mašinstvo, vazduhoplovne tehnologije i održavanje

## Sažetak:

*U radu su prikazane mogućnosti integrisanih sistema za ocenu stanja struktura. Detaljno su prikazana laboratorijska ispitivanja koja su potvrdila mogućnosti piezoelektričnih senzora da na zadovoljavajući način obavljaju emitovanje, odnosno prijem Lambovih talasa i otkriju postojanje prskotina u panelima vazduhoplovnih konstrukcija, primenom „puls-eho“ metode. Za potrebe pretraživanja većih površina dat je prikaz korišćenja fazno pomenog rasporeda piezoelektričnih senzora-davača kako bi se formirao ultrazvučni strukturalni radar. Za obezbeđenje kvaliteta pretraživanja PWAS imaju mogućnost samotestiranja, koristeći svojstva elektromehaničke impedance.*

*Key words: integrisani, piezoelektrični senzori-davači, Lambovi talasi, ocena stanja bez razaranja, održavanje.*

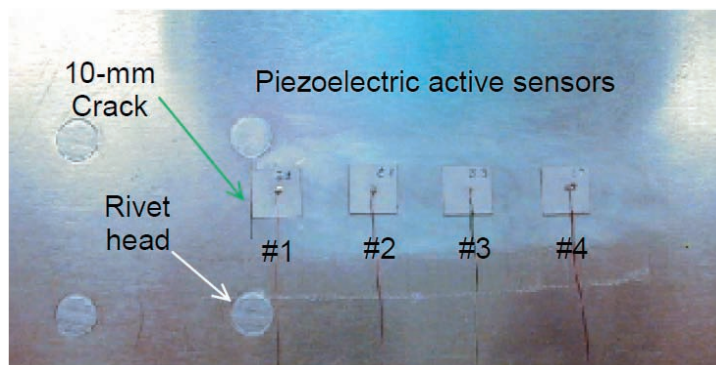
## Uvod

Uпотреба integrisanih sistema za ocenu stanja složenih struktura bez razaranja predstavlja naprednu tehniku koja predstavlja prelaz od konvencionalnih, ultrazvučnih metoda ka integrisanim sistemima za praćenje stanja „SHM“ (Structural Health Monitoring). Ovakvi i slični sistemi ugrađuju se u savremene konstrukcije, kao što su recimo vozila „IVHM“ (Integrated Vehicle Health Management). Praćenje stanja složenih struktura, kao što su letelice, zbog svojih specifičnosti, zahteva razvoj malih, lakih, jeftinih i prilagodljivih senzora koji mogu biti integrisani u strukturu sa minimalnim uticajem na masu i uz prihvatljivo povećanje troškova.

## Integrisani u strukturu

Integrisani sistemi za praćenje stanja veoma su bitni za kvalitetnu ocenu stanja [1] strukture. Ovi senzori treba da budu u stanju da prate promene stanja u realnom vremenu i signaliziraju prisustvo defekata kao i početnih, inicijalnih oštećenja. Sadašnja, uobičajena ultrazvučna ispitivanja, tankozidnih strukt-

ura (npr. oplata trupa i krila vazduhoplova, zidova rezervoara za smeštaj goriva ili velikih cevovoda) zahtevaju priličan utrošak vremena i znatnu preciznost, koju nije lako postići prilikom ispitivanja većih površina. Jedna od metoda kojom se može povećati efikasnost u inspekciji struktura predstavlja korišćenje „vođenih“ talasa (npr. Lambovi talasi), umesto konvencionalnih ultrazvučnih talasa [2]. „Vođeni“ talasi se prostiru duž sredine površine tankih ploča ili takozvanih plitkih ljuski, i imaju osobinu da se prenose na relativno velika rastojanja sa veoma malim gubitkom amplitude što im pruža mogućnost u pokrivanju velike površine sa minimalnim brojem instalisanih senzora [3]. „Vođeni“ Lambovi talasi otvaraju nove mogućnosti za isplativo otkrivanje oštećenja u vazduhoplovnim strukturama i veliki broj radova je objavljen u skorije vreme koji se bave ovom temom [4]. Tradicionalno, „vođeni“ talasi su generisani – uneseni impulsnim tonom u površinu oplata pod određenim uglom, uz pomoć relativno velikog generatora ultrazvučnih talasa [5]. Šnelovim zakonom omogućena je konverzija na mestu interfejsa koja se odatle, kombinacijom pritisnih i smicajnih talasa, simultano generiše u tanku ploču. Konvencionalne Lambove sonde (klinasti ili češljasti pretvarači) suviše su teške i skupe da bi ušle u razmatranje za masovnu primenu na složenim strukturama (npr. vazduhoplovne strukture) kao deo „SHM“ sistema. Zbog toga se moraju koristiti drugačiji tipovi senzora. Nekoliko različitih istraživačkih centara nedavno je ispitivalo novu generaciju Lambovih talasnih davača-senzora baziranih na piezoelektričnom principu „PWAS“ (Piezoelectric Wafer Active Sensors) [6]. Ovi piezoelektrični senzori su jeftini, prilagodljivi, nezahtevni u pogledu montaže, a mogu biti montirani na površinu postojeće strukture, umetnuti između slojeva materijala i postavljeni na mestima preklopa ili unutar elemenata strukture izrađenih od kompozitnih materijala [7]. Na slici 1. prikazan je položaj piezoelektričnih senzora (PWAS) postavljenih u rednom, linijskom rasporedu, u okolini pojasa zakovica, kao i jedna veštački simulirana prskotina. Očigledan je minimalan uticaj ovih davača-senzora na strukturu koja je predmet monitoringa. Ovi PWAS su teški samo 68 mg, veoma su tanki (0,2 mm) i vrlo jeftini – 7 US \$ po komadu.



Slika 1 – Piezoelektrični aktivni senzori montirani na panelu letelice  
Figure 1 – Piezoelectric wafer active sensors mounted on the aircraft panel

Rade na piezoelektričnom principu koji uparuje elektro i mehaničke karakteristike materijala (mehaničko opterećenje  $T_{kl}$ , napon na istezanje  $S_{ij}$ , električno polje  $E_k$ , pomeranje  $D_j$ ).

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E \cdot T_{kl} + d_{kij} \cdot E_k \quad (1)$$

$$D_j = d_{jkl} \cdot T_{kl} + \varepsilon_{jk}^T \cdot E_k \quad (2)$$

gde je  $S_{ijkl}^E$  mehanička karakteristika zavisnosti materijala, merena pri nuliranom električnom polju ( $E=0$ ),  $\varepsilon_{jk}^T$  je dielektrična konstanta pri nuliranom mehaničkom opterećenju ( $T=0$ ), a  $d_{kij}$  predstavlja efekat veze piezoelektričnog elementa. Za primene nedestruktivne ocene stanja strukture PWAS senzori mogu biti korišćeni i kao aktivne i kao pasivne sonde. Zbog toga je potrebno da senzori mogu da ispune sledeće četiri potrebe [8]:

- otkrivanje relativno udaljenih oštećenja korišćenjem „puls-eho“ i „pich-catch“ metoda,
- otkrivanje relativno bliskih oštećenja pomoću metode visoke impedanse,
- praćenje nastanka i rasta prskotine korišćenjem metode akustične emisije i
- otkrivanje oštećenja uz pomoć metode „udara male brzine“.

Rad sa piezoelektričnim sensorima je drugačiji od rada sa konvencionalnim ultrazvučnim sondama. Na primer, PWAS ostvaruje svoju namenu primanjem, registrovanjem odziva ploče na pobudu izazvanu Lambovim talasima i registrovanjem ravanaskih naprezanja, dok konvencionalne ultrazvučne sonde ili senzori registruju odziv preko normalnog naprezanja. Pored toga, PWAS su čvrsto inkorporirani u strukturu i prate dinamička ponašanja strukture, dok su ultrazvučne sonde relativno slobodne od strukture i imaju sopstvena dinamička ponašanja. Na kraju, PWAS su širokopojasni uređaji, dok su ultrazvučne sonde uskopojasni uređaji. Glavna prednost PWAS nad ultrazvučnim sondama jeste u njihovoj maloj masi i malim dimenzijama, niskom profilu i niskoj ceni. Uprkos svojoj veličini ovi novi uređaji su u stanju da ispune mnoge funkcije koje imaju i konvencionalne ultrazvučne sonde. Karakteristike piezodavača korišćenih u eksperimentu prikazane su u tabeli 1 i 2, a moguće ih je naći i na web sajtu proizvođača ([www.americanpiezo.com](http://www.americanpiezo.com)). Metoda detekcije oštećenja uz pomoć elektromehaničke impedance je komplementarna tehnici koja koristi svojstva prostiranja ultrazvučnih talasa. Oprema koju nude proizvođači ultrazvučnih mernih uređaja, kao opciju, sastoji se od sondi koje imaju mogućnost upotrebe za analizu mehaničke impedanse. Metodu analize mehaničke impedanse karakteriše analiza pobudnih oscilacija koje se unose u ispitni materijal korišćenjem davača koji istovremeno mere unesenu normalnu silu i indukovanu brzinu. Savremena analiza rezultata dobijenih primenom ove

metode koristi amplitudu i fazni pomeraj za otkrivanje oštećenja na ispitivanoj površini materijala. Pri izvođenju eksperimenta dobijena je visoka tačnost rezultata, korelacija je iznosila 99,99% pri čemu je greška u izmerenoj i realnoj brzini prostiranja talasa iznosila 0,1%.

Tabela 1  
Table 1

Dimension	Units (mm)	Standard Tolerance
Length or Width of Plates	<13mm	+/-0.13mm
Thickness of All Parts	0.20mm to 0.49mm	+/-0.025mm

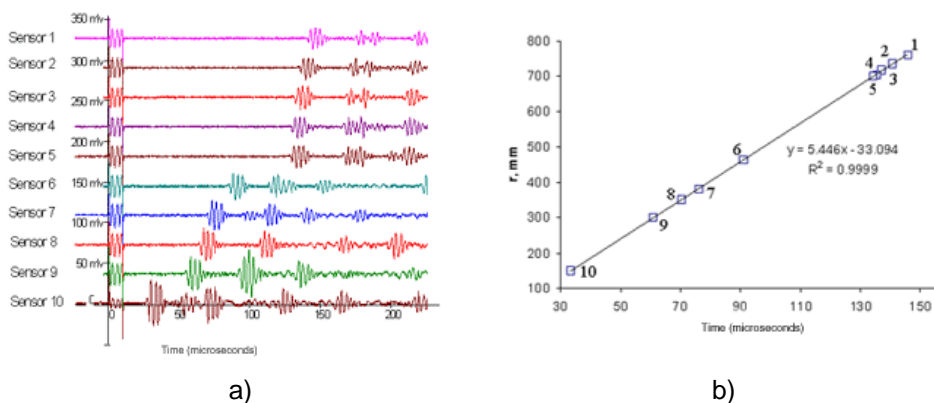
Tabela 2  
Table 2

PROPERTY	UNIT	SYMBOL	APC 840	APC 841	APC 880	APC 850	APC 855	APC 856
Relative Dielectric Constant	1	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	1250	1350	1000	1750	3250	4100
Dissipation Factor Measured: C 1 KC @ Low Field	%	$\tan\delta$	0.4	0.35	0.35	1.4	2	2.7
Curie Temperature	$^{\circ}\text{C}$	$T_c$	325	320	310	360	195	150
Coupling Coefficient	1	$k_p$ $k_{33}$ $k_{31}$ $k_{15}$	0.59 0.72 0.35 0.70	0.60 0.68 0.33 0.67	0.50 0.62 0.30 0.55	0.63 0.72 0.36 0.68	0.65 0.74 0.38 0.66	0.65 0.73 0.36 0.65
Piezoelectric Coefficient	$10^{-12}$ C/N or m/V	$d_{33}$ $-d_{31}$ $d_{15}$	290 125 480	275 109 450	215 95 330	400 175 590	580 270 720	620 260 710
Piezoelectric Coefficient	$10^{-3}$ V-m/N or $\text{m}^2/\text{C}$	$g_{33}$ $-g_{31}$ $g_{15}$	26.5 11 38	25.5 10.5 35	25 10 28	26 12.4 36	19.5 8.8 27	18.5 8.1 25
Young's Modulus	$10^{10}$ N/m <sup>2</sup>	$Y_{11}^E$ $Y_{33}^E$	8 6.8	7.6 6.3	9 7.2	6.3 5.4	6.1 4.8	5.8 4.5
Frequency Constants L=Longitudinal Mode T=Thickness Mode R=Radial Mode	Hz-m or $\text{m}^2/\text{s}$	$N_L$ $N_T$ $N_R$	1524 2005 2130	1700 2005 2055	1725 2110 2080	1500 2032 1980	1475 1930 1980	--- 1980 ---
Elastic Compliance	$10^{-12}$ $\text{m}^2/\text{N}$	$S_{11}^E$ $S_{33}^E$	11.8 17.4	11.7 17.3	10.8 15.0	15.3 17.3	14.8 16.7	15.0 17.0
Density	g/cc	$\rho$	7.6	7.6	7.6	7.7	7.5	7.5
Mechanical Quality Factor	1	$Q_m$	500	1400	1000	80	75	72

### PWAS generisani Lambovi talasi

Osnovni principi generisanja Lambovih talasa i njihova detekcija putem PWAS davača-senzora verifikovana je u laboratorijskim uslovima u jednom jednostavnom eksperimentu. Pravougaona ploča dimenzija 914 mm

x 504 mm x 1,6 mm pokrivena je sa 11 kvadratnih PWAS senzora debljine 0,2 mm (APC 850), koji su postavljeni u rasporedu pravougaone mreže. Na ovaj način pripremljen eksperiment omogućio je autorima da verifikuju upotrebu Lambovih talasa u postupku njihovog generisanja, odnosno detektovanja od strane PWAS senzora. Tom prilikom je registrovana višesmerna transmisija, a signali su bili dovoljno jaki i sa prihvatljivim nivoom šuma koji je omogućavao detektovanje „eho-a” (odziva). Dokaz ovih osobina je posebno važan za PWAS, koji su ipak manji, lakši u odnosu na konvencionalne ultrazvučne davače, uz karakteristiku da su i mnogo manji potrošači energije. Da bi se dokazalo da su Lambovi talasi koji su pobuđeni od strane PWAS višesmerni, korišćen je jedan PWAS (označen brojem 11) kao predajnik, a ostali PWAS (od 1 do 10) kao prijemnici. Signali koji su registrovani u ovom eksperimentu prikazani su na slici 2. U svakom redu, elektromagnetska veza između inicijalnog signala („bang”) vidi se u blizini izvora. Zatim, uočavamo prvi talasni paket, koji odgovara talasu koji je dobijen od PWAS predajnika, a praćen je ostalim talasnim paketima koji odgovaraju refleksiji od krajeva ploče. Vremenska razlika između inicijalnog signala i vremena dolaska talasnog „paketa” predstavlja vreme „leta” (Time of flight). TOF na taj način definiše razdaljinu koju je prešao talas. Slika 2b pokazuje linearnu, pravolinijsku zavisnost između TOF i rastojanja. Kosina (nagnutost ili ugao) ove linije predstavlja brzinu eksperimenta  $c_g = 5,446$  km/s, dok teorijska brzina iznosi, 5,440 km/s. Veoma dobra podudarnost između teorijske i realno postignute brzine potvrđuje mogućnosti korišćenja Lambovih talasa koje generišu PWAS. Talasi su dovoljno jaki i čisti, rasprostiru se višesmerno i na zadovoljavajući način odgovaraju teorijskim pretpostavkama.

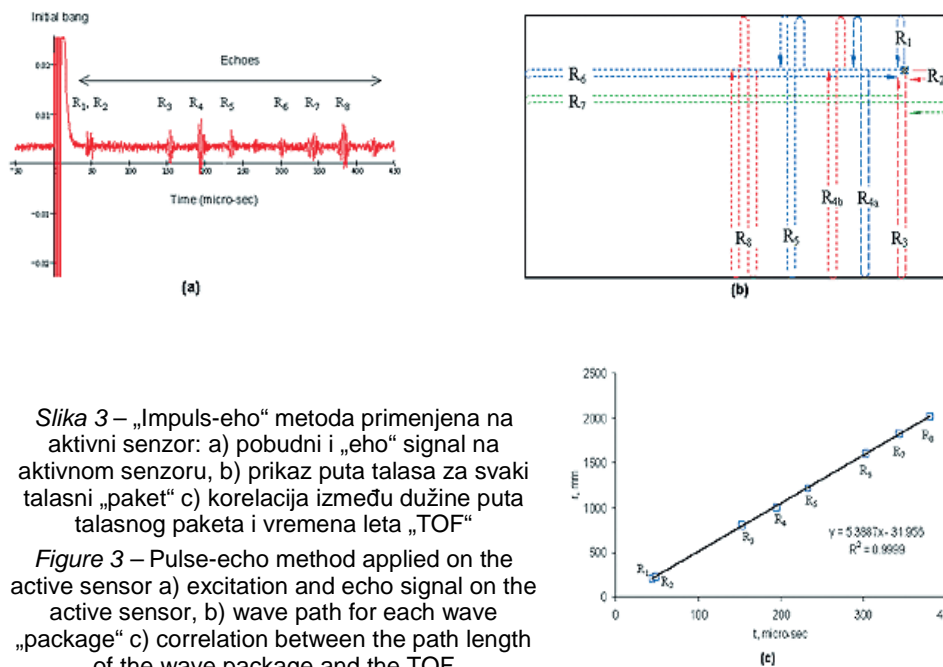


Slika 2 – a) Prijem signala od strane aktivnih senzora 1-10, korelacija između radijalnog rastojanja i vremena leta „TOF” (Time of flight)

Figure 2 – a) Signal reception of active sensors 1-10, corellation between the radial distance ant the Time of Flight (TOF)

## Impulsni eho postignut upotrebom PWAS

Piezoelektrični senzori (11) upotrebljeni su kako bi se pokazale „eho“ karakteristike. Na slici 3a. prikazano je da signal sa senzora 11. ima dve jasne zone. Inicijalni talas (udar), tokom koga PWAS 11 radi kao predajnik i „eho“ zonu koja sadrži talasne „pakete“ reflektovane od krajeva ploče i poslate nazad ka PWAS 11. Ovi povratni talasi obrađeni su radi ocene mogućnosti ove metode („puls-eho“ metoda). Kako talas generisan od inicijalnog udara pretrpi višestruke refleksije od krajeva ploče, svaka od tih refleksija ima drugačiji put, kao što se i vidi na slici 3b. Interesantno je primetiti da su dužine puta za refleksiju  $R_1$  i  $R_2$  približno iste. Zbog toga su i „eho“-i  $R_1$  i  $R_2$  u „impuls-eho“ signalu skoro superponirani. Takođe, interesantno je primetiti da refleksija  $R_4$  ima dva moguća puta  $R_{4a}$  i  $R_{4b}$  koji su iste dužine. Odatle i odzivi koji odgovaraju ovim dvema refleksijama stižu istovremeno i formiraju jedan jači „eho“, koji ima približno dvostuki intenzitet u poređenju sa ostalim povratnim signalima – „ehoima“. Crtež TOF svakog pojedinačnog „eho“-a prikazan je na slici 3c. Prava linija ima veoma dobru korelaciju ( $R^2=99,99\%$ ). Odgovarajuća brzina talasa iznosi 5,389 km/s (što je blizu teorijske vrednosti od 5,440 km/s). „Eho“-i su snimljeni sa razdaljine od preko 2 m, što je izuzetno za tako mali ultrazvučni uređaj. Na taj način pokazano je da je PWAS u potpunosti sposoban za predaju i prijem impulsnih „eho“ signala zapanjujuće snage i čistoće.

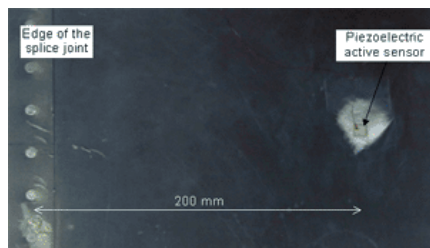


Slika 3 – „Impuls-eho“ metoda primenjena na aktivni senzor: a) pobudni i „eho“ signal na aktivnom senzoru, b) prikaz puta talasa za svaki talasni „paket“ c) korelacija između dužine puta talasnog paketa i vremena leta „TOF“

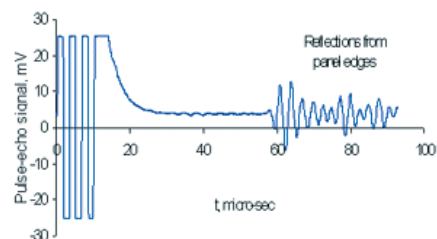
Figure 3 – Pulse-echo method applied on the active sensor a) excitation and echo signal on the active sensor, b) wave path for each wave „package“ c) correlation between the path length of the wave package and the TOF

## Otkrivanje prskotina uz pomoć PWAS

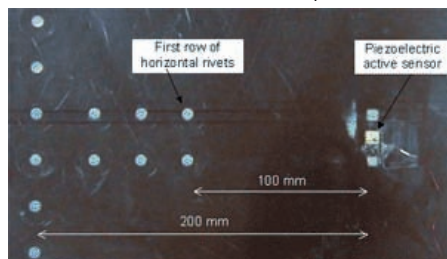
Ekspерименти sa širenjem talasa izvršeni su na panelima letelica da bi se ilustrovala mogućnost otkrivanja prskotine primenom „puls-eho“ metode. Panel koji je ispitivan bio je tipične vazduhoplovne konstrukcije, sa osobinama koje ga odlikuju, posedovao je vertikalni spoj i horizontalne učvršćivače. Na slikama 4<sub>a</sub>, 4<sub>c</sub> i 4<sub>e</sub> prikazani su načini instalacije PWAS na strukturalno kompleksniji panel. Na slikama 4<sub>b</sub>, 4<sub>d</sub> i 4<sub>f</sub> prikazan je izgled registrovanih signala na PWAS. PWAS su locirani na sličnim mestima (200 mm udesno od vertikalnog reda zakovica). Na slici 4<sub>a</sub> prikazana je situacija koja je najjednostavnija, u kojoj je prisutan samo vertikalni red zakovica na levom kraju slike. Na slici 4<sub>b</sub> prikazan je inicijalni signal (centriran, na vremenskoj osi od 5,3 $\mu$ s) i višestruki odziv od upletenih krajeva ploče. Povratni talasi, „eho“-i, (odzivi) počeli su da pristižu posle otprilike 60  $\mu$ s. Na slici 4<sub>c</sub> prikazan je vertikalni red zakovica, daleko levo, i dodatni horizontalni dupli red zakovica prema PWAS.



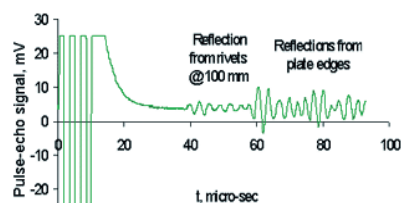
a)



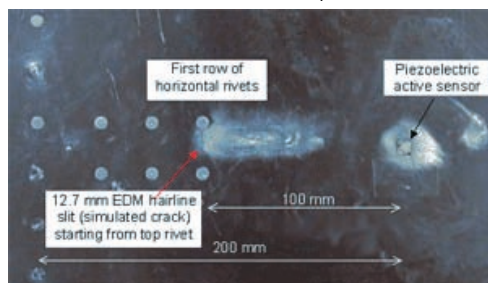
b)



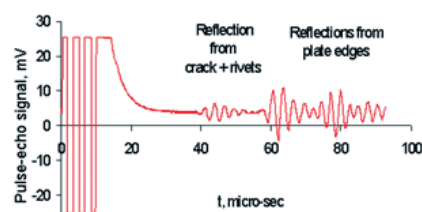
c)



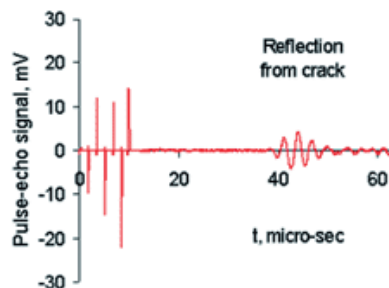
d)



e)



f)



g)

*Slika 4 – Eksperiment otkrivanja prskotine u laboratorijskim uslovima: 4a-4c (panel, 1 mm 2025T3) uzorci sa postepeno povećanom složenosti*  
*Figure 4 – Experiment showing the crack detection in laboratory conditions: 4a-4c (panel, 1 mm 2025T3) samples with gradually increased complexity*

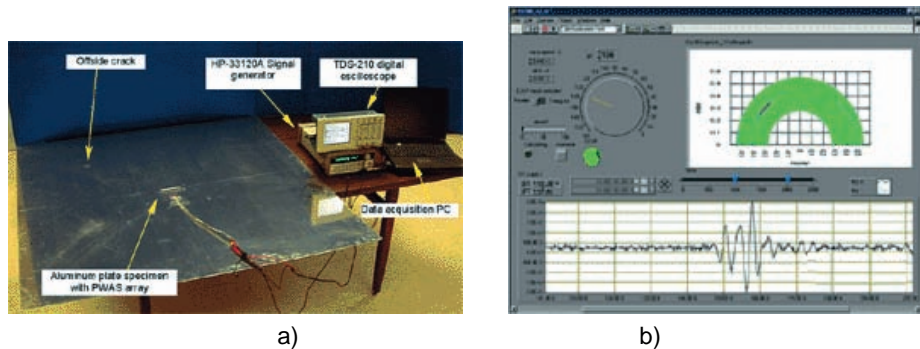
Na slici 4d vidi se da su sensorima registrovani višestruki povratni talasi od krajeva panela i spojeva, ali i da PWAS registruju i pozadinski šum od zakovica koje su pozicionirane na početku horizontalnog pojasa zakovica. Ovi pozadinski šumovi uočljivi su u okolini 42  $\mu\text{m}$ . Na slici 4e, prikazana je oblast panela koja je slična prethodno razmatranoj uz još jednu osobinu. Na ovom panelu veštački je generisana prskotina (12,7 mm, EDM prerez debljine vlasi kose) koja se nalazi pored prvog otvora za zakovicu u gornjem horizontalnom redu. Na slici 4f prikazan je izgled dijagrama koji veoma liči na dijagram koji je dobijen u prethodnom opitu. Primećuje se jedino mala razlika na poziciji 42  $\mu\text{m}$ . Karakteristika na 42  $\mu\text{m}$  odgovara superpoziciji refleksije od zakovice i od prskotine. Otkrivanje prskotine izgleda veoma problematično, jer su „eho“-i od prskotine i zakovice superponirani. Ova otežavajuća okolnost rešena je korišćenjem metode diferenciranja signala (npr. oduzimanje signala koji je prisutan na slici 4g). U praksi, ovakva situacija bi odgovarala oduzimanju signala od prethodno snimljenog zapisa na neoštećenoj strukturi, a zatim analize dobijene razlike. Na ovaj način javlja se potreba za formiranjem banke podataka o svakoj pojedinačnoj strukturi koja se prima od korisnika. To je upravo situacija koja se koristi kod sistema za praćenje stanja koji se nalaze na savremenim letelicama. Kada se dva signala oduzmu njihova razlika će ukazati na postojanje oštećenja. „Eho“, markiran kao refleksija od prskotine, nalazi se na 42  $\mu\text{m}$  (npr. TOF=37  $\mu\text{m}$ ) koja odgovara 5,4 km/s, 200 mm-tarskom ukupnom putu od PWAS do prskotine koja se nalazi na 100 mm. Jasnoća i čistoća signala od otkrivene prskotine je zapanjujuća. To je razlog što je PWAS ocenjen kao sposoban za registrovanje čiste i nedvosmislene detekcije strukturalnih oštećenja – prskotina. Ručno brisanje, podešavanje ugla zvučnog izvora može se ostvariti pomoću upravljačkog dugmeta. Signal i odziv pri određenom upadnom uglu (ovde je  $\phi_0=136^\circ$ ) prikazan je na slici 5.



## Fazno pomereni PWAS

Prednosti upotrebe fazno pomerenih davača za ultrazvučna ispitivanja je velika. Kompanija „Krautkramer Inc.“ prizvodi linearno fazno pomerene davače koji se koriste za inspekciju veoma tankih uzoraka, kao i za bočna ispitivanja tankih zidova ili ploča. Ovi davači mogu da iniciraju ulazne talase koji se generišu kroz površinu materijala. U ovim istraživanjima upotreba tehnike fazno pomerenih davača razvijena je za potrebe struktura sastavljenih od tankih zidova (oplate aviona, rezervoari za skladištenje, velike cevi u cevovodima, gasovodima, naftovodima) koje se ispituju upotrebom Lambovih talasa kako bi se pokrila velika površina. Istraživači su ovaj uređaj nazvali „integrisani ultrazvučni strukturalni radar“ i pokazali njegovu efikasnost na realnoj konstrukciji. PWAS su raspoređeni u mrežu koju su činili kvadratni elementi stranice 7 mm sa ravnomernim rastojanjem između njih od 9 mm. PWAS fazna mreža bila je postavljena u centru kvadratne aluminijumske ploče stranice 1,2 m (slika 5); šablon talasa koji je generisan od fazno raspoređenih davača rezultat je superponiranja talasa generisanih od svakog pojedinačnog elementa. Sekvencijalnim impulsima svakog pojedinačnog elementa u rasporedu davača u približnim vremenima, ultrazvučni talasni front može biti fokusiran ili upravljani – vođen u određenom pravcu. Zbog toga je elektronsko brisanje i refokusiranje talasnog snopa dobijeno bez fizičkog manipulisanja davačima. Usputno, kontrola široke zone ploče postala je moguća kreiranjem ultrazvučnih Lambovih talasa koji pokrivaju celu ploču. Jedanput, kada je upravljanje snopom i njegovim fokusiranjem postalo moguće, određivanje mesta oštećenja postalo je relativno jednostavno. U toku eksperimenta koji bi dokazao efikasnost metode pretpostavljene su dve tipične situacije. U prvom slučaju to je 19 mm dugačka bočna prskotina, pozicionirana na 409 mm od rasporeda davača u smeru  $136^\circ$ .

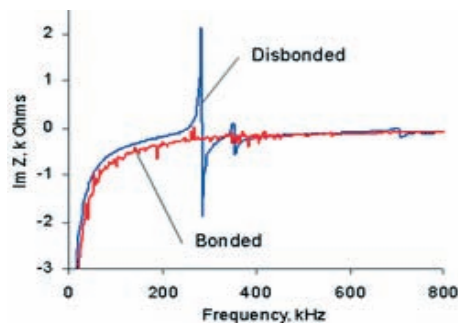
Ovde se vidi da je „eho“ koji je primljen sa strane prskotine predstavljao samo pozadinski šum generisan na krajevima prskotine. Slika 5a desno vizualizuje metodu otkrivanja prskotine, predstavlja prednju ploču integrisanog ultrazvučnog radarskog grafičkog interfejsa (EUSR-GUI). Čišćenje signala je automatsko, kako bi se slika strukturalnog oštećenja pokazala u prozoru desno. Ručno podešavanje može se postići okretanjem kontrolnog točkića. Niži prozor pokazuje rekonstruisan ugao snopa  $\Phi_0=136^\circ$  koji odgovara lokaciji prskotine, slika 5b.



Slika 5 – Potvrda koncepta eksperimenta: tanka ploča sa devet piezoelektričnih davača i prskotinom od 19 mm  
 Figure 5 – Verification of the experiment concept: thin plate with nine piezoelectric probes and the 19 mm crack

### *PWAS self test (samotestiranje)*

Kako su PWAS sonde čvrsto zalepljene na strukturu, trajnost lepka i mogućnost sonde da se odvoji od strukture treba uzeti u obzir. Prema svemu što je rečeno, potrebno je propisati proceduru kojom će se utvrditi kvalitet veze između davača i strukture. Procedura je zasnovana na PWAS elektromehaničkoj impedansi. Na slici 6 crvena kriva uporedno daje prikaz  $I_m Z$  spektra dobro zalepljene sonde PWAS za strukturu [9].



Slika 6 – Samotestiranje spoja piezodavača i strukture čije se stanje prati  
 Figure 6 – Self-test of the bond of the PWAS and the structure monitored

Ukoliko to jeste slučaj javiće se pravilna kriva sa malim rezonancama u strukturi. Nepričvršćeni PWAS pokazuje jaku sopstvenu rezonancu i bez strukturne rezonance pri vrednosti od 267 kHz (plava kriva). Pojava ove rezonance PWAS i nestanak strukturne rezonance karakteriše osobi-

nu koja nedvosmisleno ukazuje na pojavu odvajanja PWAS od strukture i može se koristiti za samotestiranje (automatsko) PWAS senzora. Za lakše raspoznavanje ovih otkaza poželjno je snimiti vibracije.

## Zaključak

Integrirani NDE piezoelektrični wafer senzori PWAS mogu biti strukturalno integrirani ili fazno pomereni. Mogu biti postavljeni čak i u zatvorenim strukturama u toku proizvodnje ili remonta (kao što je slučaj sa strukturama krila) i ostavljeni na tom mestu u toku celog životnog (radnog) veka strukture. Integrirani sistem NDE otvara nove horizonte primene PWAS senzora radi pronalaženja oštećenja „In-situ“ – na mestu ugradnje, što znači na samom sredstvu i u realnim uslovima eksploatacije i praćenju stanja struktura, kao što su letelice, rakete, sudovi pod pritiskom, tankovi za gorivo i cevovodi. Ova napredna tehnologija je u razvoju i zahteva ozbiljna istraživanja kako bi se u potpunosti iskoristio sav njen potencijal. U eri sve veće konkurencije na tržištu korisnik čija bi se služba održavanja samo bavila savršenim održavanjem svojih letelica ne bi imao šanse da ekonomski preživi. Takav prilaz održavanju doveo bi ga do toga da bi sve letelice koje ima u floti bile u izuzetno dobrom stanju uz samo jednu manu – sve vreme bi provodile u hangarima [10]. Primena integriranih piezoelektričnih wafer senzora umnogome olakšava i pojednostavljuje pronalaženje oštećenja na sredstvima, naročito ako je korisnik oformio banku podataka sa unesenim snimcima odziva struktura koji su izrađeni pri prethodnim pregledima i kontrolama. Na taj način bi se pratio prirast oštećenja i donosile odluke o karakteru intervencija na strukturi.

## Literatura

- [1] Kropas-Huges, C. V., „*Vision of future directions of NDE*“, Review of quantitative Nondestructive evaluation, vol 21, 2002.
- [2] „*Emerging technology guided waves ultrasonics*“, June 1998.
- [3] Viktorov, I. A., „*Rayleigh and Lamb waves*“ Planum press 1967.
- [4] Dalton, R. P., Cawley, P., Lowe, M. J. S., „*The potential of guided waves for monitoring large areas of metallic aircraft structure*“, Nondestructive evaluation 2001.
- [5] Alleyne, D. N, Cawley, P., „*Optimization of lamb wave inspection techniques*“ NDTE International 1992.
- [6] Keilers, C. H., Chang, F. K, „*Identifying delamination in composite beam using built-in piezoelectrics*“, Intelligent material systems and structures 1995.
- [7] Giurgiutiu, V. et al, Zagrai, A., „*Characterization of PWAS*“, J. Intelligent material systems and structures 2000.
- [8] Giurgiutiu, V. et al, Zagrai, A., „*Embedded active sensors for In-situ structural health monitoring of thin wall structures*“, Pressure vessel technology 2002.

[9] Lines, D., Dickson, K., „*Optimization of high frequency array technology for lap-joint inspection*“, Proceedings of the 3rd Joint conference on aging aircraft. 1999.

[10] Jovičić, S. „*Primena sredstava za zaštitu od korozije - put ka ekonomičnijem održavanju*“, *Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier)*, Vol. 57, No. 2, pp 94–100, ISSN 0042–8469, UDK 623+355/359, Beograd, 2009.

## EMBEDDED NDE WITH PIEZOELECTRIC WAFER-ACTIVE SENSORS

FIELD: Mechanical Engineering, Aeronautical and Space Engineering

### Summary

*Embedded nondestructive evaluation (NDE) is an emerging technology that will allow for the transitioning from conventional ultrasonic methods to embedded systems for structural health monitoring (SHM), such as those envisaged for the Integrated Vehicle Health Management (IVHM). Structural health monitoring for IVHM requires the development of small, lightweight, inexpensive systems to be embedded in the airframe with minimum weight penalty and at affordable costs. For non-destructive evaluation, PWASs can be used as both active and passive probes. The main advantage of PWASs over conventional ultrasonic probes lies in their small size, light weight, low profile, and low cost. In spite of their size, these novel devices are able to replicate many of the functions of the conventional ultrasonic probes.*

### PWAS-generated Lamb waves

*The basic principles of Lamb-wave generation and detection by PWAS probes were first verified in simple laboratory experiments. The time difference between the initial bang and the wave-package arrival represents the time-of-flight (TOF). The TOF is consistent with the distance traveled by the wave. Very good accuracy is observed, proving that PWAS-generated Lamb waves are loud and clear, propagate omnidirectionally, and correlate well with the theory.*

### Pulse-echo with PWAS

*A piezoelectric wafer-active sensor was used to demonstrate pulse-echo capabilities. These echoes were processed to evaluate the pulse-echo capabilities of the method. Since the wave generated by the initial bang underwent multiple reflections from the plate edges, each of these reflections had a different path length. The echoes were recorded from over 2 m distance, which is remarkable for such small ultrasonic devices. Thus, it was proven that PWASs are fully capable of transmitting and receiving pulse-echo signals of remarkable strength and clarity.*

### PWAS crack detection

*Wave-propagation experiments were conducted on an aircraft panel to illustrate crack detection through the pulse-echo method. The panel has a typical aircraft construction, featuring a vertical splice joint and hori-*

zontal stiffeners. In practice, such a situation would correspond to subtracting a signal previously recorded on the undamaged structure from the signal recorded now on the damaged structure. Such a situation of using archived signals is typical of health monitoring systems. When the two signals were subtracted, the result indicated the presence of the crack. This differential signal shows a loud and clear echo due entirely to the crack. Thus, PWASs were determined to be capable of clean and unambiguous detection of structural cracks.

#### PWAS phased arrays

The advantages of phased-array transducers for ultrasonic testing are multiple. By sequentially firing the individual elements of an array transducer at slightly different times, the ultrasonic wave front can be focused or steered in a specific direction. Thus, electronic sweeping and/or refocusing of the beam was achieved without physically manipulating the transducers. In addition, inspection of a wide zone was possible by creating a sweeping beam of ultrasonic Lamb waves covering the whole plate. Once the beam steering and focusing was established, crack detection was done with the pulse-echo method.

#### PWAS self-test

Since the PWAS probes are adhesively bonded to the structure, the bond durability and the possibility of the probe becoming detached are of concern. To address this, a PWAS self-test procedure has been identified that can reliably determine if the sensor is still perfectly attached to the structure. The procedure is based on PWAS in-situ electromechanical impedance. This emerging technology requires a sustained R&D effort to achieve its full developmental potential for applicability to full-scale aerospace vehicles.

The capability of embedded piezoelectric wafer-active sensors (PWASs) to perform in-situ nondestructive evaluation (NDE) is explored in this article. Laboratory tests are used to prove that PWASs can satisfactorily perform Lamb wave transmission and reception, and crack detection in an aircraft panel with the pulse-echo method is illustrated. For large-area scanning, a PWAS phased array is used to create the embedded ultrasonic structural radar. For quality assurance, PWASs are self-tested using electromechanical impedance.

Key words: *Embedded, wafer-active sensors, Lamb waves, nondestructive evaluation, maintenance.*

Datum prijema članka: 20. 05. 2010.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 18. 10. 2010.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 20. 10. 2010.