

LASER-GENERATED ULTRASOUND IN SOLIDS

M. Blaháček*, J. Zídek*, M. Landa*, P. Urbánek*, V. Bajgar*

Summary: *To better understand ultrasonic wave propagation in thin-wall structures (e.g. glass or composite plates) and to evaluate physical properties of the structure material, new methods for ultrasonic wave generation are necessary. Optical technique using Nd:YAG pulse laser as the wave source is suitable method example. Recorded wave analysis requires application of advanced time-frequency transformation, as is wavelet transformation, by reason of the wave dispersion. In the paper laser ultrasound technique is discussed and some important results of wavelet analysis are shown.*

1. Úvod

Po 2. světové válce se v širší míře začalo užívat ultrazvuku k nedestruktivnímu testování materiálů a průmyslových konstrukcí a vznikla řada prací s touto tematikou, např. Krautkrämer (1990) a Převorovský (1998). Většina metod je založena na generování podélné nebo příčné objemové vlny v materiálu a na záznamu přijaté vlny jsou sledovány odrazy od vnitřních nehomogenit. Pro diagnostiku tenkostěnných konstrukcí a vrstevnatých materiálů se v poslední době v rostoucí míře využívá tzv. guided waves, tj. vln složených z mnohonásobných odrazů v rámci tloušťky stěny konstrukce. Výhodou užití guided waves je zejména možnost detekovat poruchy v materiálu na dlouhou vzdálenost a možnost pracovat s vlnami o nízké energii, takže nedochází k ovlivňování vlastností měřeného tělesa nebo konstrukce. Guided waves vykazují (geometrickou) disperzi – frekvenční závislost rychlosti šíření, jejíž ignorování může vést k významným chybám v závěrech učiněných o existenci či neexistenci kritických defektů ve vyšetřované konstrukci. Nelze tedy v případě aplikace nedestruktivního testování pomocí guided waves slepě přejímat dosud rutinně užívaná řešení založená na detekci podélné nebo příčné objemové vlny. Souhrnný přehled podává článek Chimenti (1997), disperzním efektům se věnuje práce Landa (1999).

Přijátá vlna však nenese pouze informaci o případných nehomogenitách, ale i o materiálu samotném. Proto dnes ultrazvuk rovněž hraje významnou roli při vyšetřování mechanických vlastností materiálu, zejména vlastností nekovových materiálů, jako jsou polymery, kompozity, keramické a organické materiály, jak dokládá Achenbach (1993).

* Ing. Michal Blaháček, PhD., Ing. Jan Zídek, Ing. Michal Landa, Csc., Ing. Přemysl Urbánek, Ing. Vlastimil Bajgar: Ústav termomechaniky, Akademie věd České republiky; Dolejškova 5; 182 00 Praha 8; tel.: +420.266 053 122, fax: +420.286 584 695; e-mail: blahacek@it.cas.cz

Ve výše uvedených případech narážíme na problém vybudit v konstrukci ultrazvukovou vlnu. Navíc je nezbytná vynikající reprodukovatelnost této vlny, zdroj by měl být přesně lokalizován a definován. Mělo by být možné vybudit akustické vlnění v libovolném místě konstrukce.

Všechny tyto požadavky splňují bezkontaktní optické ultrazvukové metody, které se intenzivně studují posledních asi 10 let. Metody jsou založeny na využití pulsních laserů. Pokud totiž necháme dopadnout paprsek koherentního světla laseru na povrch vzorku, dojde různými mechanismy závisujícími na povaze materiálu a jeho povrchu k absorpci části energie paprsku a zbytek se odrazí od povrchu nebo je jím rozptýlen. Podle energie (a částečně i vlnové délky) dopadajícího laserového paprsku je možné rozdělit laserové metody do dvou podskupin. První užívají laserových pulsů s malou energií (do 10 mJ u kovových materiálů), které nepoškodí testovaný vzorek, ale pouze jej lokálně zahřejí. Výsledkem je generování tepelných a elastických vln šířících se pevným tělesem. Druhá skupina je založena na aplikaci pulsů o vyšší energii, které způsobí odpaření materiálu a zformování plazmy v místě dopadu (viz. obrázek 1). Při tom je povrch vzorku (případně celý vzorek) poškozen.

Jako nejlepší z hlediska reprodukovatelnosti se jeví nanesení tenké vrstvy černé barvy na povrch vzorku. Stejněměrný homogenní film vyrovná případné rozdíly ve vlastnostech povrchu vzorku, chrání vzorek před poškozením laserovým paprskem a černá barva zlepšuje absorpci laserového záření a umožňuje tak použití laserů s nižším výkonem.

2. Experiment

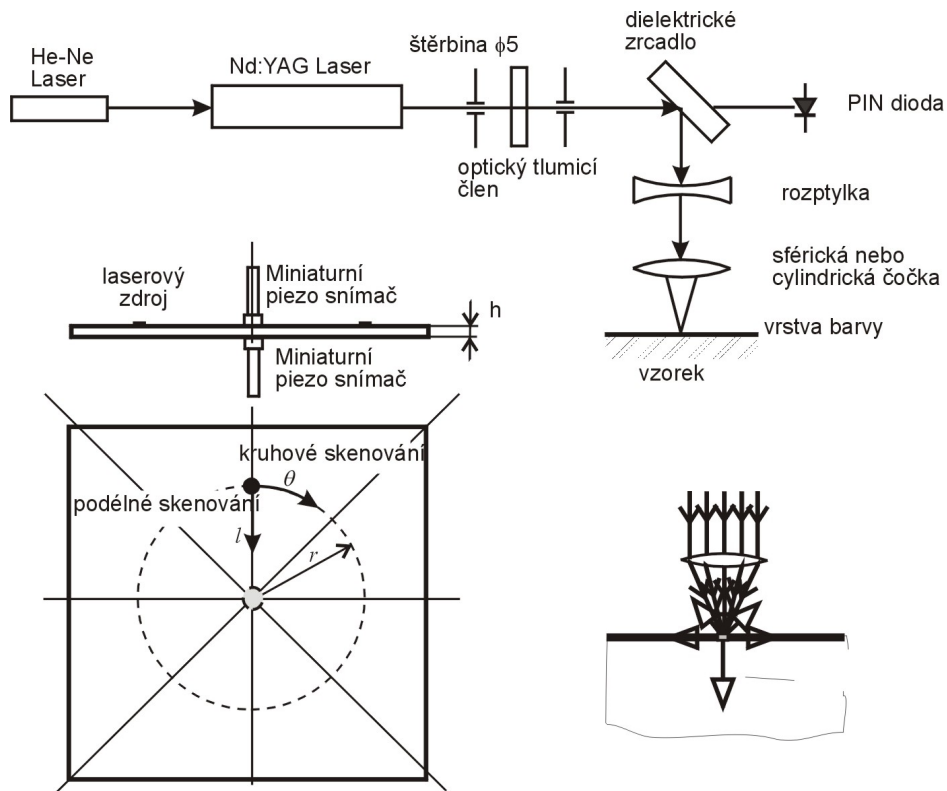
Pro ověření možností laserového buzení ultrazvukových vln byly v ÚT použity vzorky ve tvaru desek různé tloušťky a z různých materiálů. Nejjednodušší případ představují desky z homogenního izotropního materiálu, skla. Experimenty, jejichž podrobný popis je uveden v práci Blaháček (2001), byly prováděny na vzorcích o rozměrech 280×280 mm a tloušťkách 2, 3, 4, 5, 6 a 8 mm. Anizotropní materiály byly při experimentech zastoupeny deskami z uhlíkových kompozitů CFRP s orientací $[0]_x$, které byly připraveny z prepregu Fibredux S913C-HTA-(12k)-5-40%. Vzorek CFRP0-2, který nás zajímá nejvíce, měl rozměry 250×250 mm, tloušťku 1,83 mm změřenou se směrodatnou odchylkou 0,1 mm, hustotu $1,60 \text{ g/cm}^3$ a skládal se celkem ze 14 vrstev tkaniny.

K vybuzení ultrazvukové vlny v definovaném místě vzorku byl použit infračervený pulsní laser Nd:YAG (model TWO-45Q, General Photonics Corporation) zaměřovaný spřaženým He-Ne laserem. Paprsek laseru byl rozdvojen pomocí polopropustného zrcadla. Jeden z paprsků byl použit k vybuzení zdroje vlnění, druhý spínal (přes fotodiodu) záznamové zařízení. Ve středu desek byly umístěny piezoelektrické snímače PIN-ducer VP-1093-A50, Valpey-Fisher (snímač stejného typu na líci a rubu desky – proti sobě). Povrch testovaných vzorků byl nastříkán vrstvou černé barvy o tloušťce 40 μm pro zlepšení absorpce laserového záření, jak je schematicky znázorněno na obrázku 1.

Signál ze snímačů byl zesílen předzesilovači (+40dB, 20kHz – 2MHz) a byl zaznamenán digitálním osciloskopem Le Croy 9304 AM, vzorkovací frekvencí 100 Mhz a s fyzickým rozlišením 8 bit. Byla užita funkce osciloskopu zvyšování rozlišení o 1 bit pomocí interpolace. Obvyklá délka záznamu byla 200 nebo 500 μs .

Ultrazvukové vlny byly buzeny v různých vzdálenostech od piezoelektrických snímačů (oba byly v průběhu jednoho měření pevně mechanicky přichyceny k desce pomocí

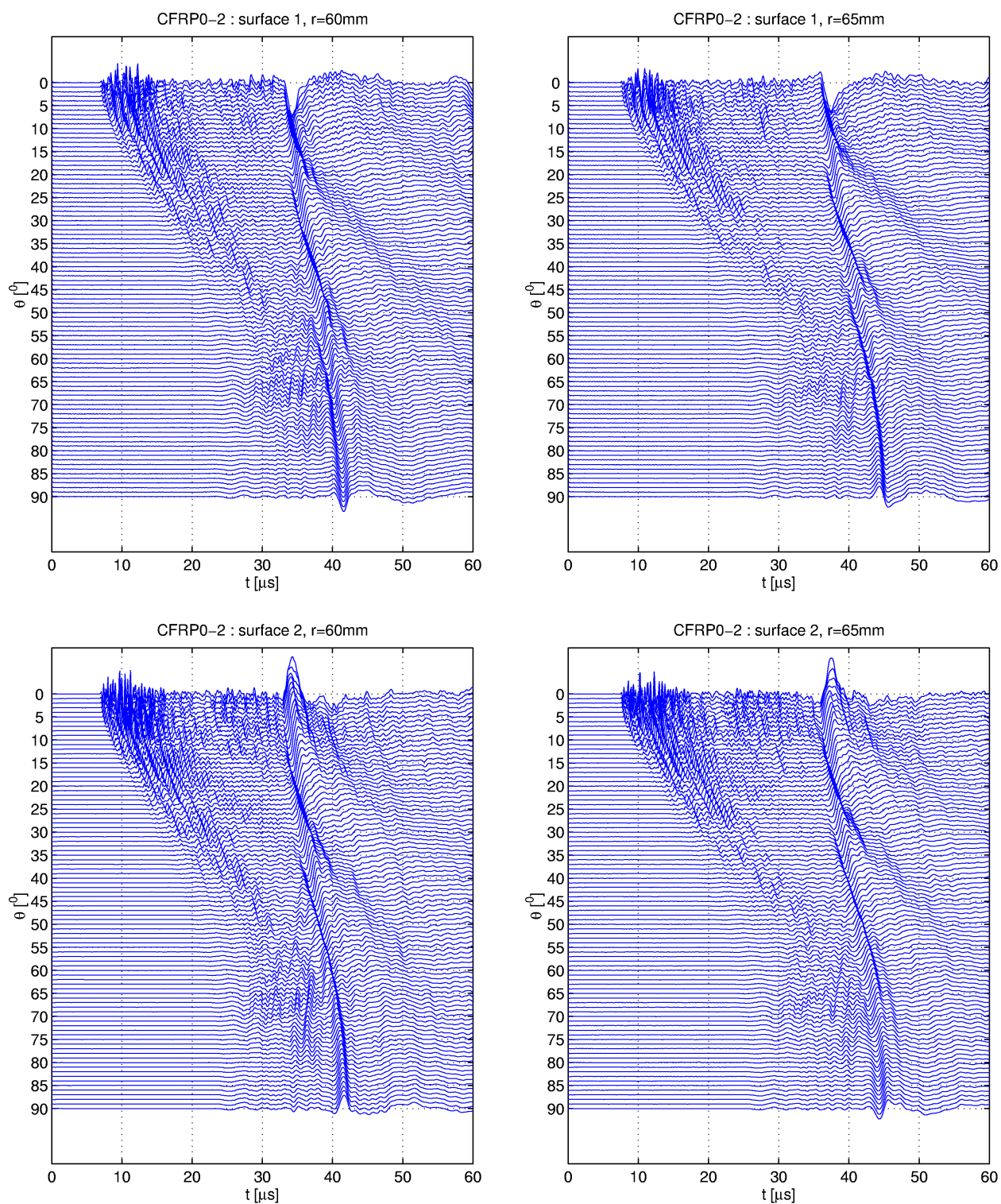
přípravku). Nejmenší vzdálenost zdroj – snímač činila 20 mm, největší 100 mm. Rozestup zdrojů byl 1 mm. Kromě skenování vzorku v podélném směru bylo prováděno kruhové skenování s cílem zaznamenat a popsat anizotropní vlastnosti vzorků. V tomto případě bylo k dispozici polohovací zařízení řízené počítačem, které významně celé měření urychlilo a zvýšilo přesnost polohování na hodnoty ručně nedosažitelné.



Obrázek 1: Uspořádání experimentu, princip kruhového, resp. podélného skenování vzorku a princip vybudění zdroje ultrazvukových vln laserovým paprskem.

3. Zpracování naměřených dat

Na obrázku 2 jsou zakresleny naměřené signály ze vzorku CFRP0-2 pro úhly 0 - 90° (kruhové skenování vzorku) a pro vzdálenosti zdroj – snímač 60, resp. 65 mm. V horní části obrázku jsou signály ze snímače umístěného na téže straně desky na kterou dopadal laserový puls, v dolní části obrázku signály z protilehlé strany. Z obrázku je zřejmý typický disperzní charakter šíření ultrazvukových vln tenkou deskou. Ve výsledném signálu převládají tzv. guided waves - vlny vzniklé součtem mnohonásobných odrazů uvnitř desky. Rychlost těchto vln je závislá nejenom na směru šíření, ale rovněž na frekvenci, přesněji na součinu frekvence a tloušťky desky (geometrická disperze).



Obrázek 2: Signály získané kruhovým skenováním vzorku CFRP0-2, pro vzdálenosti zdroj – snímač 60 a 65 mm. Záznamy ze snímače na horní straně desky (horní část obrázku) a snímače z dolní části desky (dolní část obrázku).

V izotropních a ortotropních materiálech (pro vlny šířící se v hlavních směrech) jsou pozorovatelné dva základní módy guided waves, symetrický a antisymetrický. Tyto módy jsou charakterizovány posunutími povrchu desky ve směru normály která jsou symetrická, resp. antisymetrická vzhledem k centrální rovině desky. Tato vlastnost spolu s použitím dvojice společně trigrovaných a proti sobě umístěných piezosnímačů umožňuje zvýraznit jeden z módů součtem, resp. rozdílem zaznamenaných vln, jak je ilustrováno na obrázku 3. B je označen signál zaznamenaný snímačem umístěným na horní straně desky, C signál zaznamenaný snímačem ze spodní strany desky. V součtu B + C jsou zvýrazněny symetrické módy guided waves, v rozdílu B – C módy antisymetrické.

Disperzní povaha guided waves nás nutí při jejich analýze použít některou z časofrekvenčních distribucí a navíc takovou, která v sobě uchovává jak informace o čase, tak o frekvenci. V minulosti se nejčastěji v těchto případech používala okénková Fourierova transformace, dnes se častěji užívá transformace waveletová, která je univerzálnější.

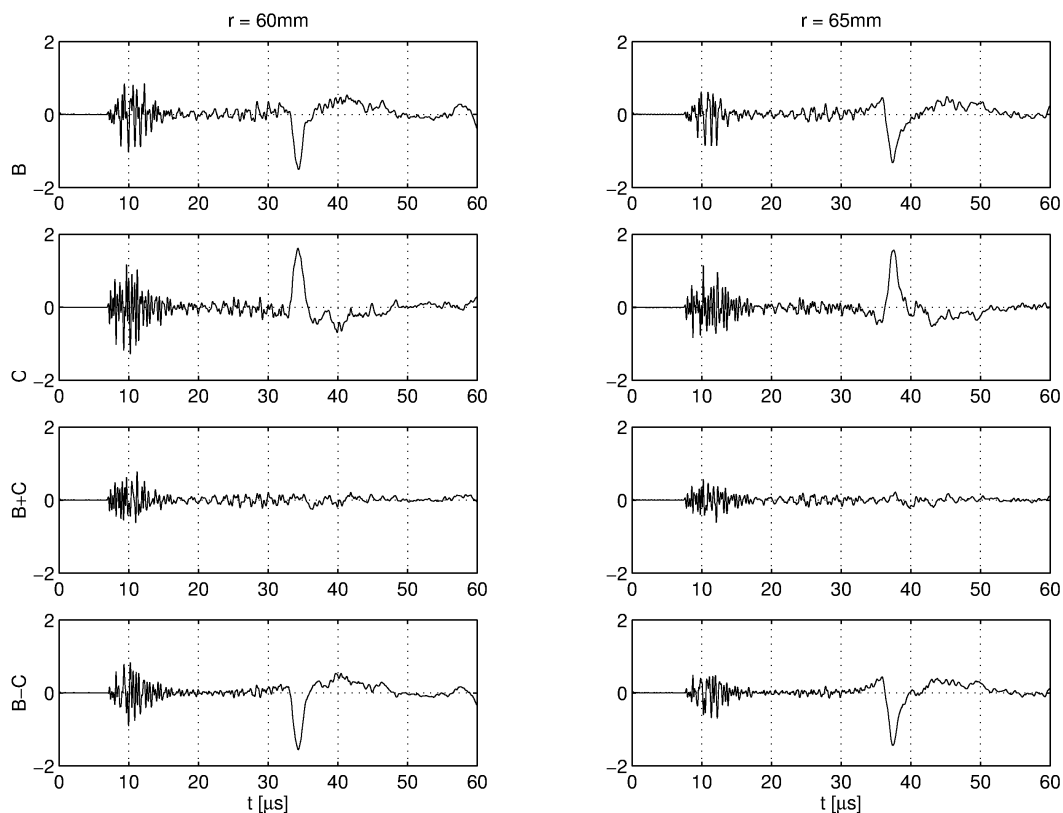
Spojité waveletová transformace (WT) je definována vzorcem

$$Wf(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

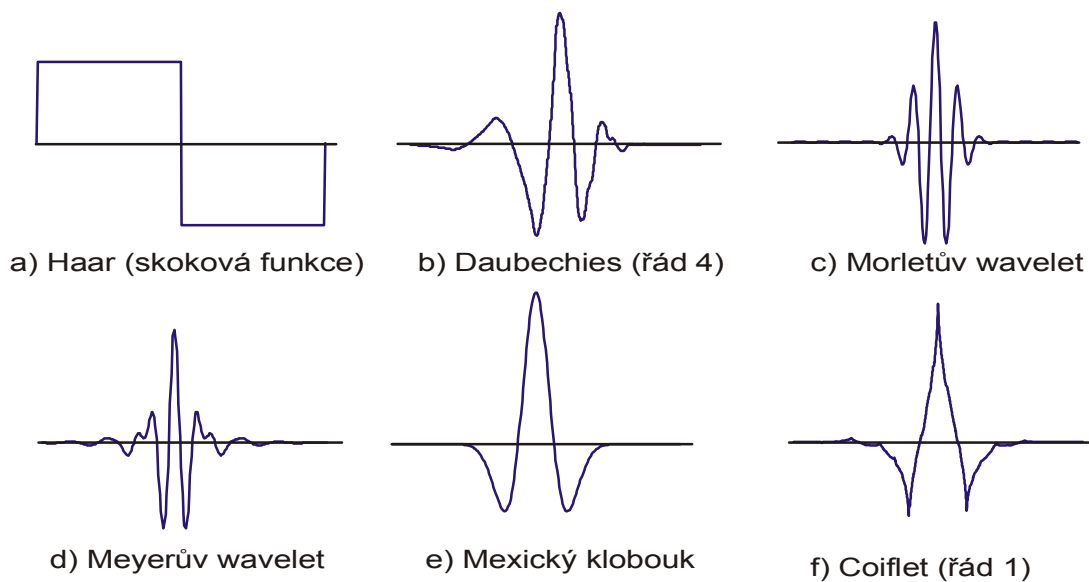
kde f je vstupní signál, $a > 0$ je škálovací parametr (odpovídá frekvenci), b je posunutí (obvykle časové) a Wf je transformovaný signál. Funkce Ψ se nazývá wavelet a její volbou z mnoha známých rodin waveletů (příklady jsou uvedeny na obrázku 4) je možno modifikovat chování transformace a lépe ji přizpůsobit aktuálním potřebám a transformovaným signálům. Pro analýzu signálů získaných měření vzorku CFRP0-2 se jako vhodný ukázal wavelet Daubechies 5 (db5), viz. obrázek 5. Diskrétní waveletová transformace je definována stejně jako spojitá s výjimkou povolených hodnot parametrů a , b . Ty jsou voleny ve škále odpovídající mocninám dvojky. Efektivní cesta k výpočtu diskrétní WT pomocí filtrů byla navržena Mallatem (1989) a je nazývána rychlá waveletová transformace (FWT). FWT dělí signál na dvě části: aproximace (A nebo Lo), což je nízkofrekvenční část původního signálu a detaily (D nebo Hi), což je část vysokofrekvenční. Kaskádovým schématem, kdy je výstup jedné transformace zároveň vstupem dalšího kroku, dosáhneme relativně rychlého výpočtu diskrétní WT až do požadované hloubky dané hodnotami parametru a . Signály získané v jednotlivých krocích značíme Lo1, Lo2, ... a Hi1, Hi2, ...

Na obrázku 6 je vidět výsledek FWT, kterou byly od sebe odděleny jednotlivé módy guided waves, konkrétně módy S_0 , A_0 a A_1 . Byly nalezeny waveletové rozklady signálů B + C a B – C, ve kterých byly nejvíce zvýrazněny výše uvedené módy. Tak pro mód S_0 to byl rozklad Hi3, pro mód A_0 rozklad Hi5 a pro mód A_1 rozklad Lo7.

Ke zjištění grupových rychlostí šíření jednotlivých módů guided waves ve směru vláken kompozitu (souhrn viz. tabulka 1) byla použita metoda vzájemných korelačních funkcí (kroskorelace). Tou byl zjištěn časový posun Δt mezi signály naměřenými pro vzdálenost zdroj – snímač 60 mm a 65 mm. Jelikož rozdíl ve vzdálenostech zdrojů $\Delta r = 5$ mm je znám, bylo možno vypočítat hledané rychlosti ($v_g = \Delta r / \Delta t$).



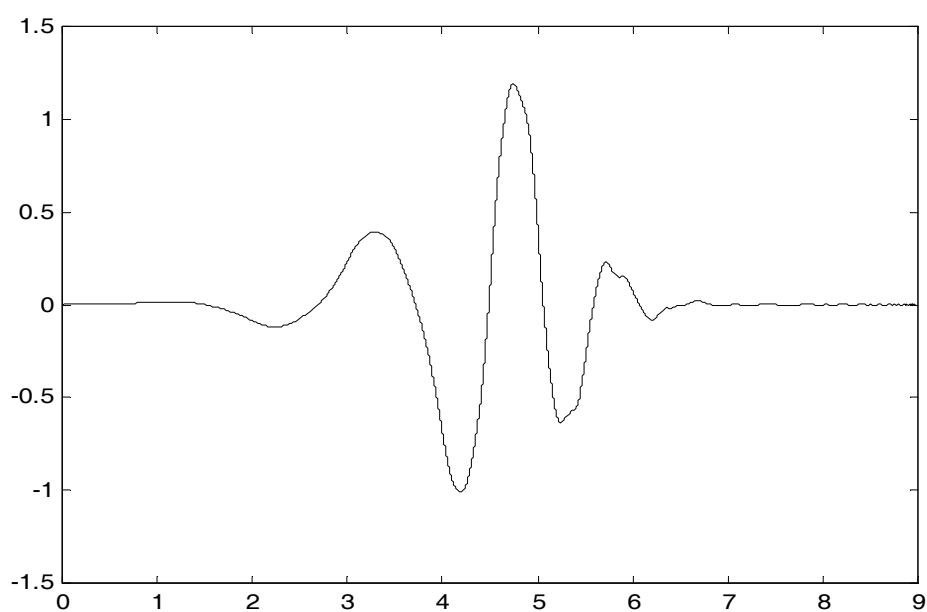
Obrázek 3: Oddělení symetrických a antisymetrických módů guided waves ve vzorku CFRP0-2 pomocí součtu (symetrické módy) a rozdílu (antisymetrické módy) naměřených signálů.



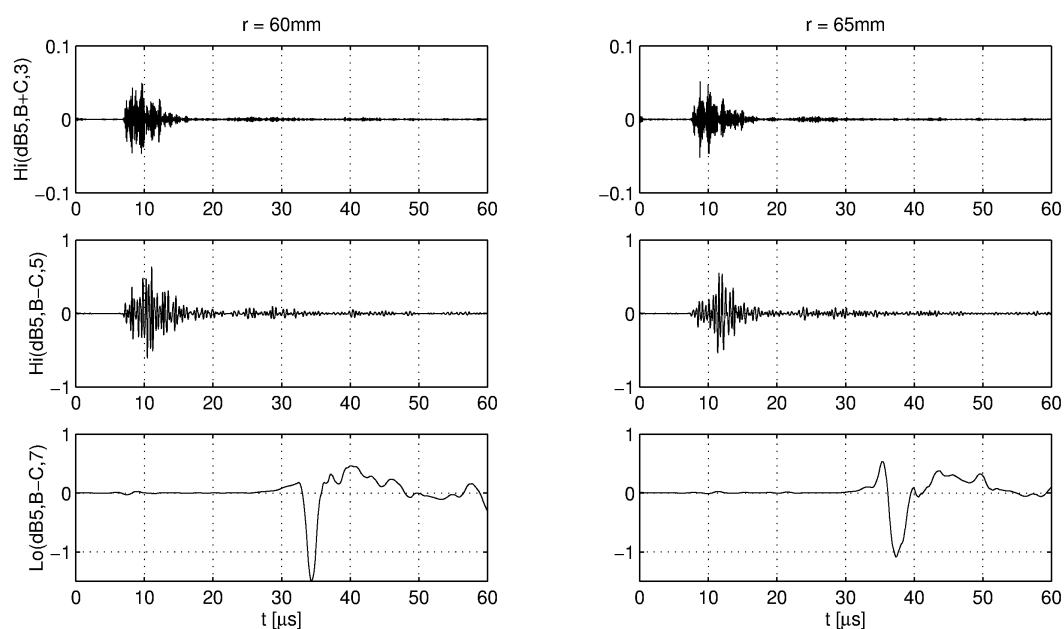
Obrázek4: Některé základní typy waveletů.

Tabulka 1: Rychlosti vln ve směru vláken kompozitového vzorku CFRP0-2.

Mód	S_0	A_0	A_1	
Δt	0,56	3,23	0,95	μs
v_g	8,929	1,548	5,263	$\text{mm}/\mu\text{s}$



Obrázek 5: Wavelet db5, použitý k analýze signálů z tenké kompozitové desky.

Obrázek 6: Oddělení módů S_0 , A_1 a A_0 (odshora dolů) guided waves ve vzorku CFRP0-2 pomocí FWT. Použit byl wavelet db5, stupeň waveletového rozkladu je uveden v popisu každého obrázku v závorce.

4. Závěr

Při zkoumání materiálových vlastností zejména anizotropních materiálů i při nedestruktivním testování pomocí některých moderních metod, jako je metoda užívající guided waves, narážíme na problém vybudit v konstrukci ultrazvukovou vlnu, která by byla dobře reprodukovatelná a jejíž zdroj by byl přesně lokalizován a definován. Tato práce se věnuje popisu experimentů s laserem buzeným ultrazvukem v tenké kompozitové desce tloušťky cca. 2 mm. Měřicí systém, umožňující přesné polohování zdrojů UZ vln na desce, byl použit k mapování směrových vlastností vzorku. Pro separaci jednotlivých módů guided waves šířících se v tenké desce bylo použito jednak speciální konfigurace piezoelektrických snímačů a dále potom waveletové transformace, což je jedna z nejuniverzálnějších a nejšířěji diskutovaných časofrekvenčních transformací dneška. U navzájem odseparovaných módů guided waves pak byly pomocí metody vzájemných korelačních funkcí určeny grupové rychlosti šíření ve směru vláken kompozitového vzorku. Ukazuje se, že laserem buzený ultrazvuk má ve spolupráci s pokročilými metodami zpracování signálů velký potenciál pro hodnocení materiálových parametrů vrstevnatých anizotropních konstrukcí.

5. Poděkování

Tato práce vznikla díky podpoře GAČR a je součástí řešení grantových úkolů číslo 106/00/D105 a 106/01/0396.

6. Literatura

- Achenbach, J.D. (1993) *Evaluation of Materials and Structures by Quantitative Ultrasonics*, Springer-Verlag.
- Blaháček, M. & Landa, M. & Zídek, J. & Urbánek, P. (2001) *Hodnocení materiálů tenkostěnných konstrukcí pomocí bezkontaktních ultrazvukových metod*. Výzkumná zpráva č. Z 1315/01, ÚT AV ČR, Praha.
- Chimenti, D. E. (1997) Guided Waves in Plates and Their Use in Material Characterization. *Appl Mech Rev*, 50, pp.247-284.
- Krautkrämer, J. & Krautkrämer, H. (1990) *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer-Verlag, Heidelberg.
- Landa, M. at al. (1999) Geometrical dispersion effects in AE analysis of thin-wall structures. *Ultrasonics and Acoustic Emission, 35th CAS Conference Proceedings* (Trest 1998), CAS, Praha.
- Landa, M. & Blaháček, M. & Zídek, J. (2002) Evaluation of anisotropic properties of composites using laser-generated ultrasound. *International symposium on mechanics of composites*, CVUT, Praha.
- Mallat, S. (1989) A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Pattern Anal. and Machine Intell.*, 11(7), pp.674-693.
- Převorovský, Z. at al. (1998) Ultrasonic Scanning and AE of Composite Tubes Subjected to Multiaxial Loading, *Ultrasonics*, 36(1-5), pp.531-537.