



OPTICAL METHODS OF GENERATION AND DETECTION OF ULTRASOUND WAVES IN THIN-WALL STRUCTURES

Trnka Jan, Landa Michal *

***Summary:** Double pulse holointerferometry (DPHI) and laser interferometry were used to study guided waves propagation in thin-wall structures. The full-field visualisation of the displacements caused by generated waves was carried out by DPHI with ruby laser like a source of light and the source of guided waves in different time after impact. The time history of displacements and velocities was detected noncontactly in the points on the surface by vibrometr Polylec. The received signals were compared with the ones from miniature transducers.*

1. ÚVOD

Objev laseru na přelomu druhé poloviny minulého století zásadně ovlivnil nejen optiku, ale i celou řadu oblastí vědy a techniky. Lasery významně přispěly též k rozvoji ultrazvukové diagnostiky, jejíž metody jsou rutinně nasazovány pro nedestruktivní defektoskopii materiálů a konstrukcí. Propojení laserových technik s ultrazvukovými metodami vedlo k řadě kvalitativně nových poznatků v oblasti výzkumu šíření ultrazvukových vln [1].

Při dopadu fokusovaného paprsku výkonného laseru na pevný povrch je jím část dopadající energie pohlcena, část odražena či povrchem rozptýlena. Uplatní se zde zásadním způsobem jak kvalita povrchu zkoumaného vzorku, tak frekvence záření použitého laseru [2]. Při generaci ultrazvukových vln lze využít i zlomku výkonu laseru, kdy ještě nedojde k poškození povrchu fokusovaným paprskem (cca. 10 mJ pro kovy). Vyšší hustoty energie dopadajícího laserového paprsku mohou způsobit v místě jeho fokusace natavení popř. roztavení materiálu a vznik plastických oblastí, nebo mikrokáterů a tím poškození povrchu zkoumaného vzorku. Laserovým zdrojem, tj. fokusovaným paprskem, je obecně možné vybudit jak všechny typy povrchových tak i tzv. "guided" vln. U tenkých desek a skořepin převažují Lambovy vlny. Použití laserových technik pro generaci i detekce ultrazvukových vln umožňuje individuální identifikaci symetrických a antisymetrických módů těchto vln. Lineárním laserovým zdrojem lze minimalizovat pokles amplitudy Rayleighových vln i vliv apertury kontaktních snímačů [3].

Pro studium šíření vln v tenkých deskách a skořepinách je efektivní používat optické interferometrické metody - dvoupulzní holointerferometrii (DPHI) a laserinterferometrii. Prvou lze v potřebných časech "zmrazit" pole posuvů v celém osvětleném poli zkoumaného předmětu. Druhou metodou lze zaznamenat časové průběhy posuvů resp. rychlostí v jednotlivých bodech. [4]. Při DPHI byl pulzní rubínový laser použit nejen pro holografický záznam "guided" vln, ale současně byla část

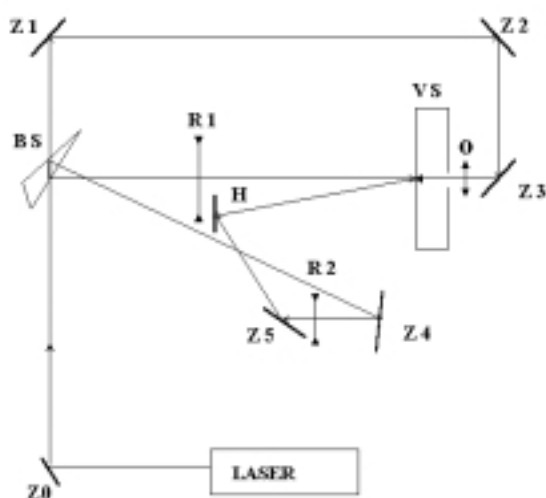
* Ing. Jan Trnka, CSc., ÚT AV ČR Dolejškova 5, 182 00 Praha 8, ČR. E-mail: trnka@it.cas.cz

Ing. Michal Landa, CSc., ÚT AV ČR Dolejškova 5, 182 00 Praha 8, ČR. E-mail: ml@it.cas.cz

jeho paprsku fokusována na povrch zkoumaného předmětu. Tak byl laserový paprsek i zdrojem vln a odpadla nutnost synchronizace záblesků laseru s dynamickým zatížením [5]. Časový průběh rychlostí či posuvů v určitých bodech povrchu zkoumaného předmětu byl bezdotykově snímán vibrometrem Polytec OFV3000. Získané signály byly porovnány se signály z PZT snímačů.

2.0 EXPERIMENT 1 – DPHI a PZT snímače

Dvoupulzní rubínový laser byl současně použit jako zdroj světla pro holointerferometrický záznam tak, pro generaci rázu. Byla zkoumána ocelová, částečně otevřená válcová skořepina o průměru 112mm, délce 300 mm a o průměrné tloušťce stěny 0.635 mm. Uvažovali jsme, že se jedná o isotropní skořepinu s těmito parametry: $E = 210$ GPa, $\mu = 0.3$ a $\rho = 7800$ kg/m³. Vzdálenost površek “otevření” skořepiny byla 60mm. Skořepina byla bodově podepřena na čtyřech bodech, jejichž axiální vzdálenost byla 250mm.

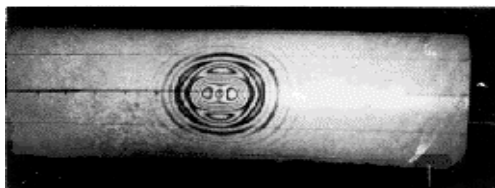


Obr. 1

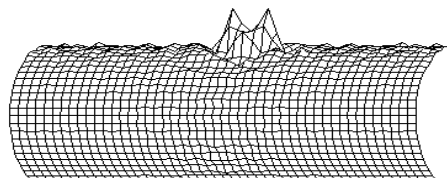
Optické schéma úlohy je na Obr.1.

Laserový paprsek je rozdělen děličem BS na tři paprsky. Prvý je fokusován objektivem O po odrazech od zrcadel Z1, Z2, Z3 na vnitřní povrch válcové skořepiny VS. Tento paprsek generuje extrémně krátký mechanický a tepelný pulz. Předmětový paprsek vzniká na čelní ploše děliče, je následně divergován rozptylkou R1, osvětluje předmět. Referenční paprsek vzniká při odrazu na vnitřním povrchu děliče, po odrazech na zrcadlech Z4, Z5 dopadá na holografickou desku. Na Obr.2a,b jsou uvedeny výsledky pro čas 30 μ s po rázu. Fotografie dvoupulzního holointerferogramu a

jemu odpovídající výsledek získaný pomocí MKP ukazuje “zmrazený” stav pole posuvů v uvedeném čase ve sledované skořepině [4]. Vlny s menší amplitudou než $\lambda/4$, přičemž λ je vlnová délka rubínového laseru, nejsou na hologramu zaznamenány. Při kolmém rázu na tenkou rovinnou desku jsou interferenční proužky soustředné kružnice [6]. V případě skořepiny jsou soustředné jen pro velmi krátkou dobu po rázu, pak dochází k porušení soustřednosti a postupně ke vzniku dvou a dále čtyř vrcholů, které se od sebe šíří a to jak v axiálním, tak v obvodovém směru. Podle teorie, která se zabývá šířením vln ve skořepinách,



Obr. 2a (30 μ s)

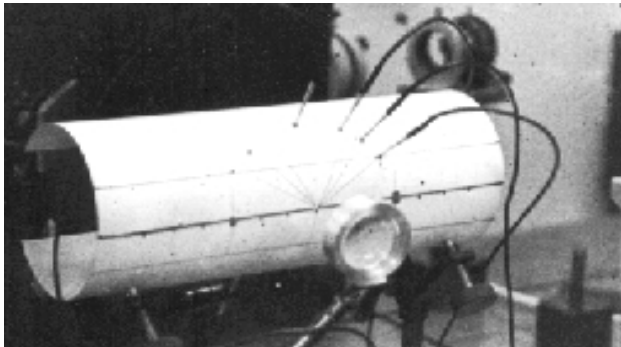


Obr. 2b (30.5 μ s)

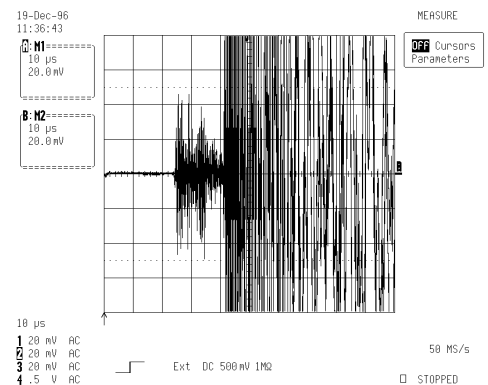
má dominantní vliv na jejich tvar křivost skořepiny. Ta způsobuje její geometrickou anizotropií [7].

Obr. 2 poskytuje sice celkový pohled na pole posuvů v čase 30 μs po rázu, ale je zřejmé, že i ze série podobných snímků nelze spolehlivě vyhodnotit rychlost šíření vln ve zkoumané skořepině.

Pro posouzení vlivu geometrické anizotropie, jakož i pro změření rychlostí dominantních vln ve sledované skořepině jsme použili piezokeramické snímače. Skořepina byla buzena fokusovaným paprskem rubínového laseru na svém vnějším povrchu. Umístění snímačů je zřejmé z obr. 3. Signály snímačů byly zaznamenány digitálním osciloskopem LeCroy 9304 AM. Na obr.4a,b,c, jsou uvedeny signály pouze ze dvou snímačů. Obr.4a ukazuje celý zaznamenaný průběh, na obr. 4b,c jsou detaily průběhů [8].

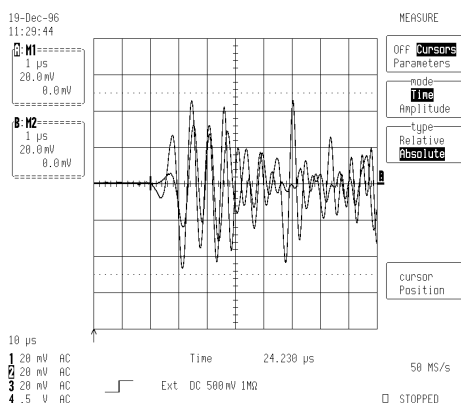


Obr. 3

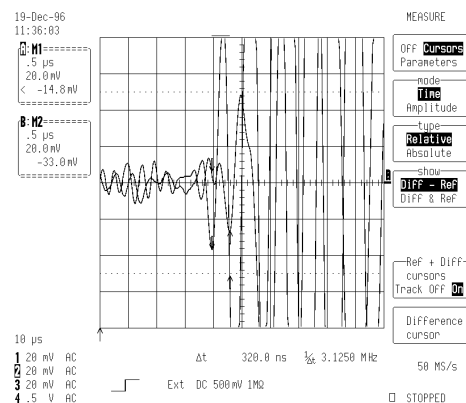


Obr.4a

Porovnáním tvarů signálů zaznamenaných v různých směrech (při stejné vzdálenosti od zdroje) jsme určili vzájemný časový posun jak u prvního nasazení (symetrický mód S_0 - "in plane" vlny), tak u příchodu signálu s řádově větší amplitudou (antisymetrický mód A_0 - ohybové vlny).



Obr.4c



Obr. 4b

Jelikož spouštění osciloskopu bylo realizováno od světelného záblesku laseru pomocí rychlé PIN diody, mohli jsme určit čas příchodu zmíněných nasazení a tedy rychlost jejich šíření. Zjištěné odchylky rychlosti šíření vln v obvodovém směru, axiálním směru, jakož i v dalších směrech

odpovídají změně vzdálenosti do 3mm, což představuje přibližně 2% vzdálenosti mezi snímačem a zdrojem. Chyba určení vzdálenosti i vliv apertury snímače představuje 1 až 2%. Vliv na rychlost šíření vln mohou mít také strukturní změny v materiálu způsobené válcováním plechu za studena do tvaru válcové skořepiny. Změřené rychlosti ze signálů uvedených na obr.4 jsou :

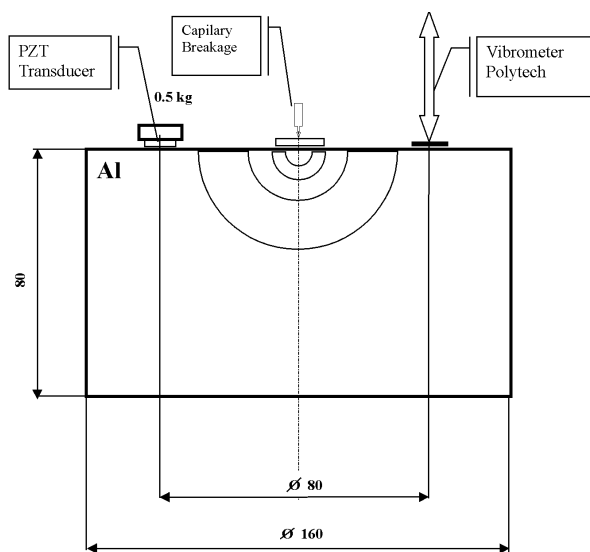
$$c(S_o) = 5.53 \text{ mm}/\mu\text{s} \quad c(A_o) = 3.38 \text{ mm}/\mu\text{s}.$$

Podrobněji se disperzní problematice věnuje práce [8]. Vliv zakřiveného povrchu na disperzní vlastnosti je možné ověřit na plném válci. Pro sledování prvních nasazení vlny šířící se podle površky ve směru osy válce můžeme uvažovat šíření vlny na povrchu poloprostoru a šíření vlny v radiálním směru válce můžeme nahradit rovinným případem šíření vln v disku. Porovnáním signálů zaznamenaných ve stejných vzdálenostech od zdroje v osovém a radiálním směru získáme rozdíly v disperzi. Zavedením dalšího volného povrchu (vnitřní průměr), lze studovat další disperzi od konečné tloušťky.

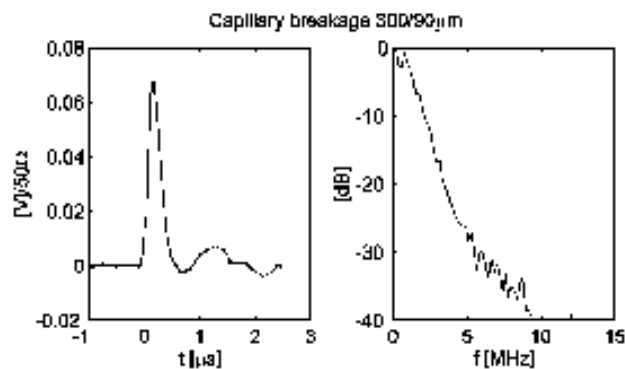
2.1 EXPERIMENT II - Laservibrometr a PZT snímače

Pro studium časového průběhu posuvů a rychlostí bodů volného povrchu hliníkového válce bylo použito experimentální uspořádání dle obr.5. Miniaturní snímač PZT byl přitisknut ke sledovanému čelu válce přes glycerinový film závažím o hmotnosti 0,5 kg.

Bezdotykové snímání pohybu bodu kolmo k povrchu bylo snímáno laservibrometerem Polytec OFV-3000, s hlavicí OFV302. Pro dosažení optimální odrazivosti bodů povrchu a potlačení vyšší úrovně šumu snímaného signálu byla použita speciální retroreflexní folie fy. 3M [9].



Obr. 5

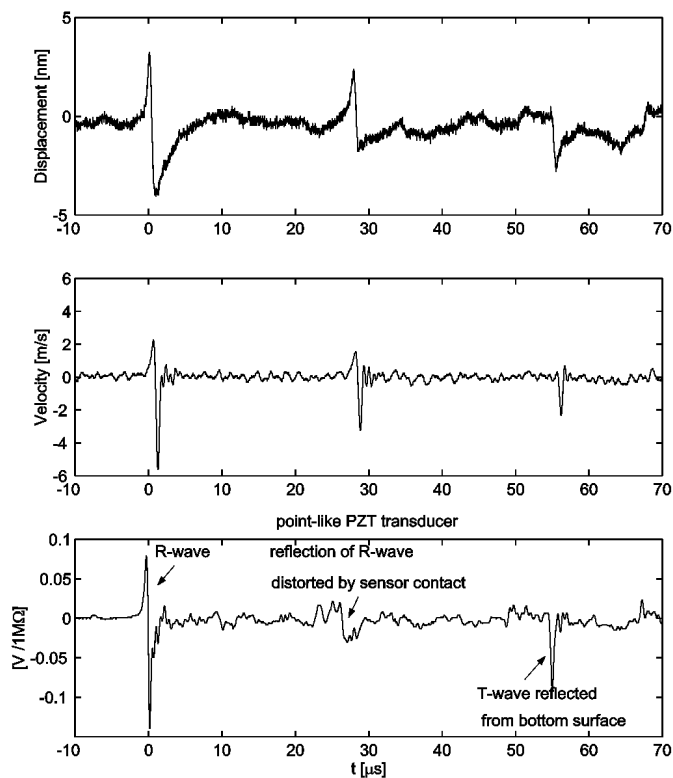


Obr.6a

Obr.6b

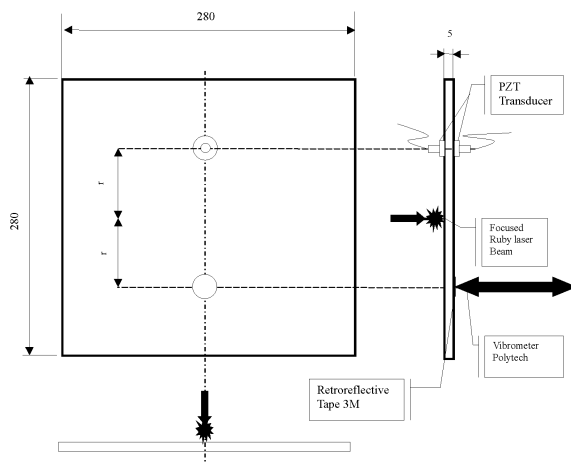
V prvním případě byly elastické vlny ve válci generovány uprostřed jeho horního čela lomem skleněné kapiláry tzv. *capillary breakage*. Časový průběh budící síly je na obr.6a, na obr.6b, je její frekvenční spektrum. Při experimentech ležely všechny tři body (snímač PZT, buzení, laser. měření) na přímce. Jejich vzdálenost byla 40 mm od epicentra (bodů zatížení). Na obr.7a představuje první

záznam časový průběh posuvů snímaných laservibrometerem.



Obr. 7a, b, c

nalepena tenká retroreflexní folie 3M. Pro kontaktní měření byly použity miniaturní PZT měniče.

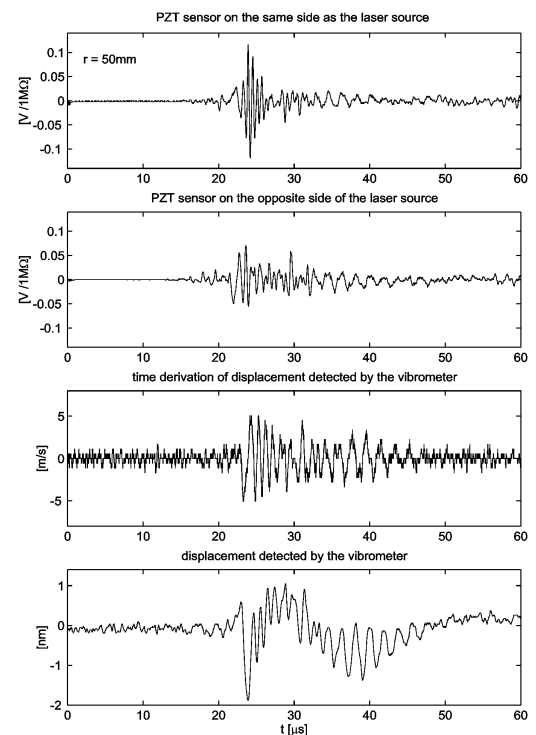


Obr.8

Současně byla zaznamenána též časová závislost rychlosti v tomto bodě viz obr.7b.

Signál ze snímače PZT je na obr.7c, kde je též vyznačena R-vlna a T-vlna. Z obrázků je zřejmá velmi dobrá shoda signálů získaných oběma postupy.

Ve druhém případě bylo zkoumáno šíření elastických vln v tenké, broušené a následně leštěné desce vyrobené z uhlíkové oceli. Deska byla původně zatěžována výbušnými drátky a odezva na toto buzení byla zaznamenávána pomocí dvoupulzní holointerferometrie. Průběhy posuvů v určitých časech po výbuchu byly konfrontovány s numerickým řešením úlohy [6]. Pro detailnější studium vlnových dějů v této desce, o rozměrech 280x280x5 mm, bylo generování rázu docíleno fokusovaným paprskem rubínového laseru na povrch desky. Uspořádání experimentu je patrné z obr.8. Bodové, bezdotykové měření rychlostí a posuvů bylo uskutečněno vibrometrem Polytec. Na body, v nichž postupně probíhalo měření, byla



Obr.9

Paprsek rubínového laseru bodově fokusovaný na kapku glycerinu na povrchu desky generoval elastické vlny. Pouze cca. 0.01% výkonu byla užita pro synchronizaci záznamů průběhů digitálním osciloskopem LeCroy 9304 AM pomocí PIN diody. Současně tedy byly měřeny odezvy ze dvou PZT snímačů, které byly umístěny proti sobě a výstupy z vibrometru - průběhy posuvů a rychlostí.

Jeden z řady záznamů je na obr.9. Pomocí piezoelektrických měničů byla naměřena odezva pulsního buzení na straně zdroje a na protilehlé straně desky. Na protilehlé straně (symetricky od zdroje) je signál ze snímače porovnán s průběhem kolmé složky posuvu a rychlosti zaznamenané vibrometrem. Z obrázku je zřejmý rychlostní charakter tvaru signálu z PZT měničů. Při podrobném lineárním skenování vzorku, kdy je vzdálenost měničů od zdroje postupně měněna, lze výsledné soubory impulsních odezev použít pro vyhodnocení disperzních vlastností desek různých tloušťek. Výsledky získané při měření s vibrometrem, posloužily nejdříve k otestování jeho možností i v těchto aplikacích a v neposlední řadě též k absolutní kalibraci snímačů AE.

3. ZÁVĚR

Výzkum prováděný pomocí dvoupulzní holointerferometrie je účelné doplnit dalšími metodami, mezi něž patří např. laservibrometrie jako bezdotyková metoda či měření signálů PZT snímači. Zatímco DPHI poskytuje integrální pohled na pole posuvů, je velmi problematické tyto výsledky kvantifikovat. Spojení výše uvedených metod umožní nejen integrální pohled na pole posuvů v daném časovém okamžiku, ale poskytne i důležité informace o vlnových dějích, které dynamický proces provázejí. Tímto postupem byla zkoumána geometrická anizotropie tenké válcové skořepiny, vyhodnocením signálů snímačů PZT byly získány příslušné vlnové rychlosti, .

Pozornost byla věnována i detekci časové odezvy v jednotlivých bodech povrchu zkoumaného objektu. Získané údaje jsou důležité nejen pro teoretické studium šíření vlnových dějů, ale i pro kvantitativní nedestruktivní diagnostiku tenkostěnných konstrukcí. Perspektivní jsou v tomto smyslu bezkontaktní metody, neboť neovlivní šíření zkoumaných vln.

4. PODĚKOVÁNÍ

Autoři práce, která vznikla při řešení Grantového projektu GA AV **Diagnostika nestacionární dynamické napjatosti v deskových a skořepinových útvarech, Reg.č. A 2076904**, děkují Grantové agentuře AV ČR za podporu při realizaci tohoto projektu.

5. REFERENCES

- [1] Scruby, C.B., Drain, L.E.: Laser Ultrasonics, Techniques and Applications, Adam Hilger 1990.
- [2] Fällström, K-E., Olofsson, K., Saradi, I., Wahlin, A.: Generating and recording transient bending waves in plates by pulsed lasers. Experimental techniques 1996 No 1.
- [3] Landa, M., et al.: Geometrical dispersion effects in AE analysis of thin-wall structures. Proc. : Ultrasonics and Acoustic Emission, 35th International Conference of Czech Acoustical Society, Sept. 14-18, 1998, p. 43
- [4] Trnka, J., Mazúch, T.: Experimental and theoretical investigation of wave propagation in cylindrical shells. Engineering Mechanics (Inženýrská mechanika), Vol.7, No.4 2000, p.277 (in Czech)
- [5] Wahlin, A.: Bending Waves in Plates Generated by Mechanical and Laser Pulse Impact. Proc. of Euromech Colloquium No 306 "Contact Impact" Prague 1993
- [6] Trnka, J., Veslý, E., Kačor, A., Plešek, J.: Experimental and Numerical Investigation of Bending Wave Propagation in Thin Steel Plate. Proc. of 38th International conference Experimental Stress Analysis, Třešť Czech Rep., 6-8 June 2000.
- [7] Geromenova, O.A.: Geometrical Theory for Flexure Waves in Shells. Journal of Acoustical Soc. of America 53(2), 535-540(1973)
- [8] Trnka, J., Landa, M.: Geometrical Dispersion of Thin Cylindrical Shells studied by Acoustic Emission and Double pulse holointerferometry methods. Colloquium Dynamics of Machines'97 February 4-5, 1997 Prague Czech Republic
- [9] Antropius, K., Trnka, J., Václavík, P.: Zvýšení kvality holografického signálu v interferogramech tvarů kmitání při použití retroreflexních náterů. JMO 1985 No.9