

**THE COMPARISON OF THE NUMERICAL MODEL OF WAVE
PROPAGATION IN BODIES WITH RESULTS OBTAINED BY USING
THE PIEZOELECTRIC TRANSDUCER.
THE IMPLICATION OF THE TRANSDUCER PRESENCE TO
THE RESULTS OF MEASURING.**

**POROVNÁNÍ NUMERICKÉHO MODELU ŠÍŘENÍ ELASTICKÝCH VLN
V TĚLESECH S VÝSLEDKY MĚŘENÍ PIEZOELEKTRICKÝM SNÍMAČEM.
VLIV PŘÍTOMNOSTI SNÍMAČE NA MĚŘENÍ.**

Štefan MORÁVKA *

Summary: This part of a more extensive work dealing with the elastic wave propagation due to a further progress of the acoustic emission method is presented. Here, the main attention is concerned to the axisymmetric bodies with offsets whose effects are qualified. The results of numerical simulations and experimental results are presented, verified and compared mutually. The numerical modeling has been realized by the finite element method using the software MARC/MENTAT. The transient broadband piezoceramic transducers have been employed for the experimental measuring on a set of real models.

In the second part of the paper, it is shown in which way the presence of the transducer can affect the measured displacement. As shown, this effect cannot be neglected, especially in the case of an absolute measuring.

Key words: elastic wave propagation, numerical modeling, FEM, experimental measuring, piezoelectric transducer.

1. Úvod.

Při rozvoji poruch v materiálu vzniká signál akustické emise (AE), který obsahuje informace o vznikajícím poškození. Aby bylo možno řešit inverzní elastodynamický problém, tj. podle snímaného signálu zpětně identifikovat, lokalizovat a charakterizovat zdroje AE, je třeba eliminovat vliv šíření signálu v tělesech, vliv okrajových ploch těles a změny signálu dané přenosovou charakteristikou snímačů a elektronickým zpracováním. Proto je nutné znát mj. Greenovy funkce zkoumaných těles. Ty lze získat výpočtem (analytickým, numerickým) nebo experimentálně. Tyto výpočty i následné řešení inverzních úloh je náročné na výkon i paměť počítače. Proto se zmínky o jejich řešení při aplikaci AE zatím objevují jen sporadicky.

Příspěvek prezentuje část rozsáhlejší práce zabývající se šířením tranzientních elastických vln v tělesech obvyklých konstrukčních tvarů – tedy numerickým a experimentálním stanovováním Greenových funkcí. Zde se zaměříme na rotačně symetrická tělesa s tvarovými přechody, různě osazené hřídele. Posuzuje se vliv velikosti těchto osazení.

* Dr. Ing. Štefan Morávka, Ústav mezioborových studií Západočeské univerzity v Plzni, Husova 11 Plzeň.
E-mail: moravka@ums.zcu.cz, tel.: 019/7235085, fax: 019/7236443.

Vzájemně porovnávány a verifikovány jsou výsledky experimentů a MKP modelů. Měření se provádí piezoelektrickým nerezonančním širokopásmovým snímačem na reálných modelech.

V druhé části práce je na numerickém modelu ukázáno, jak sama přítomnost snímače může ovlivnit měřený průběh např. posuvu kolmého k povrchu. Provedeno je i několik porovnání s experimentem.

2. POUŽITÉ METODY.

Zkušební tělesa. Měření a výpočty jsou prováděny pro 5 zkušebních těles. Jedná se o ocelové válce o délce 150 mm a průměru 55 mm, které jsou na polovině své délky osazeny na menší průměr tak, že vznikne ostrý „schod“ o výšce 0; 1; 2,5; 5 a 10 mm. To umožňuje sledovat vliv měnící se geometrie na šíření vln.



Obr.1. Fotografie zkušebních těles.

MKP modely. Tělesa jsou modelována homogenní, elastická a izotropní. Velikost konečných prvků (2,5 mm) a časového kroku ($\Delta t = 0,4 \mu s$) byly voleny v relaci tak, aby výpočet v limitním případě respektoval frekvenci do cca 1,25 MHz. Protože měření byla prováděna s frekvencí 20 MHz a průběhy jsou značně „členité“, bylo by vhodné použít menších prvků i časového kroku. Ale např. pro 10x menší prvek bychom se dostali k řádu desítek milionů prvků! V práci [11] jsme se pokusili toto omezení alespoň obejít 2D rot.sym. modelem. Shoda s měřením je pak řádově (!) lepší. Narážíme zde na technická omezení, protože nestacionární MKP výpočty s desítkami milionů prvků není zatím možné v našich podmínkách realizovat.

Tělesa jsou buzena jednotkovým skokem radiální síly na válcovém povrchu osazené nebo neosazené části (podle sledovaného směru šíření vln). Jedná se tedy o 3D úlohy. Na druhém místě se signál snímá. Výsledkem je odezva těles na jednotkový skok. Konvolucí lze pak vypočítat odezvu na složitější buzení. Poznamenejme, že se zde nejedná terminologicky přesně o Greenovy funkce, poskytující odezvu v libovolném místě na buzení v libovolném místě. Stanovujeme odezvy těles na buzení jen ve vhodně zvolených bodech. Úlohy jsou symetrické okolo roviny, v níž leží budící síla, snímaná výchylka a osa rot. symetrie vzorku. Modelujeme tedy jen 1/2 těles. Modely mají 8.400-12.000 3D 8-uzlových izoparametrických prvků. Je použita Newmarkova metoda přímé časové integrace s koeficienty $\beta = 0,275625$ a $\gamma = 0,55$, které zavádějí mírné numerické tlumení a současně zaručují bezpodmínečnou stabilitu metody. Tlumení eliminuje rušivý vliv vyšších frekvencí, podrobněji např. [3].

Pro kvalifikované stanovení parametrů MKP modelů se vycházelo z dřívějších experimentů a studií, kde byl podrobně rozebírán vztah mezi požadovanou přesností a spolehlivostí výsledků a k tomu potřebnou hustotou sítě a velikostí kroku časové integrace, viz [4]. Také byly využity předcházející práce o vedlejších jevech způsobených účinky časové a prostorové diskretizace současně, podrobněji např. v [7] nebo [8] a zkušenosti z porovnání známých analytických řešení jednoduchých těles s numerickými výpočty, např. [3].

Výpočetní hardware a software. Pro numerické simulace je použita deformační formulace MKP v systému firmy MSC MARC/MENTAT. Podařilo se zvládnout problematiku restartování dlouhých úloh, takže lze na přerušovaný výpočet navázat s minimální ztrátou dat.

Výpočty byly realizovány na pracovní stanici SGI Octane s procesorem R10.000 a pamětí 256 MB. Část se prováděla na PC PIII 450 MHz, RAM 512 MB. Překvapivě se ukázalo, že pokud probíhá výpočet „in-core“, (v paměti) je v některých případech PC až o 60% rychlejší! Porovnáme-li poměr cena/výkon, pak se tyto stroje liší řádově!

Měřicí hardware. Měření se prováděla laboratorním nerezonančním širokopásmovým snímačem AE zkonstruovaným podle [1]. Vlastnosti různých modifikací těchto snímačů byly již dříve podrobně zkoumány, např. ve [2], [5] a [10].

Pro záznam signálů byl využíván digitální osciloskop TRACE s max.vzorkovací frekvencí 40 MHz a 8-bitovým rozlišením. Buzení se provádělo Pen-testem (lomem mikrotuhy). Ukázalo se, že průměrováním více měření (tím spíše reprodukovatelných), lze i na 8-mi bitovém zařízení bez předzesílení obdržet velmi uspokojivé výsledky.

3. VÝSLEDKY VÝPOČTŮ A MĚŘENÍ NA OSAZENÝCH VÁLCÍCH.

Sledují se zejména vlastnosti šíření vln při přechodu osazení, a to oběma směry, podobně jako u osazených hranolů, [9], [11], nebo u různě hlubokých vrubů, [12]. Výsledky numerických simulací jsou konfrontovány s experimenty. Tím se posiluje jak důvěryhodnost měření (např.měření AE v terénu), tak i samotných výpočtů (klasické numerické modelování).

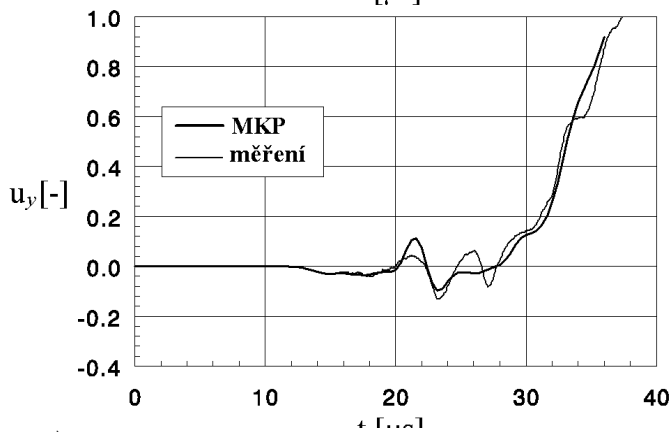
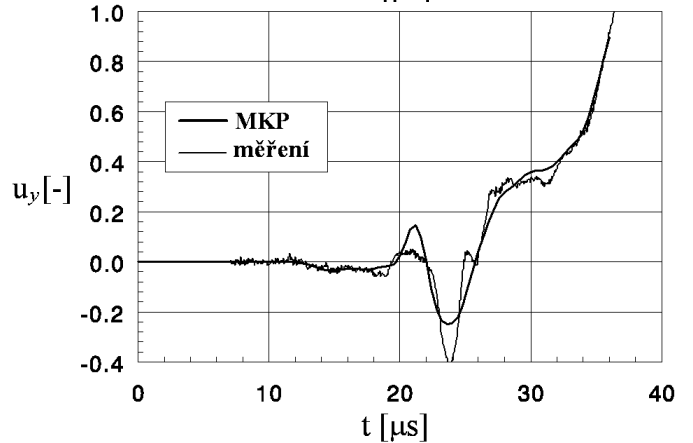
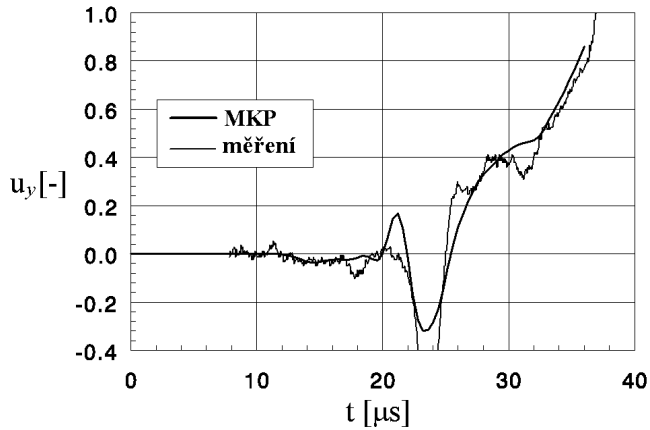
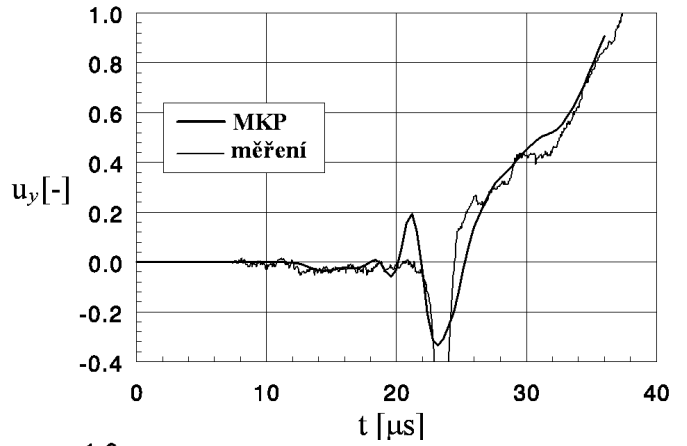
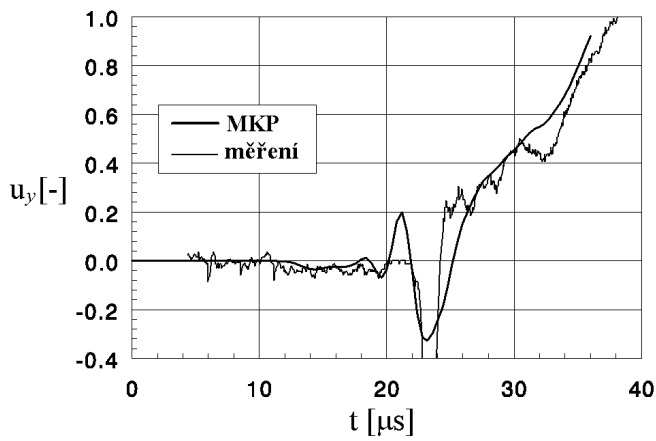
Na obr. 2 až 6 jsou pro modely s rostoucí výškou osazení vždy uvedeny časové průběhy posuvů kolmých k povrchu spočtené numericky a experimentálně změřené. Jsou uvedeny výsledky jen pro přechod vln přes osazení z osazené části do neosazené. Na obrázcích vidíme, jak MKP výpočet nedokonale zachycuje čelo Rayleighových vln. U nerotačních těles, [9], [11], [12], je toto čelo zachyceno ještě méně. Není to chyba, ale důsledek filtračního efektu MKP. Pro daný model je mezná frekvence dilatačních vln cca 1,25 MHz. Čelo Rayleighových vln je ale neseno frekvencemi okolo 3 MHz. Pravděpodobně také z důvodu absence vyšších frekvencí vzniká neshoda i před tímto čelem. MKP výsledky jsou hladké a ani nemohou obsahovat strmé změny. Jinak, odmyslíme-li si z obrázků ostré přechody, vidíme, že naměřené a vypočítané průběhy se svými tvary přibližně shodují. Největším problémem MKP modelů je frekvenční omezení dané velikostí konečného prvku.

Na naměřených průbězích vidíme, jak s rostoucí výškou osazení klesá zákmit způsobený čelem Rayleighovy vlny (cca v čase $t = 24 \mu s$). I toto relativně malé osazení je překážkou pro šíření Rayleighových vln (a to v obou směrech). U těles s nerotační geometrií (osazené hranoly, [9], [11]) je tento jev ještě markantnější. Při praktickém nasazení AE, kde se využívá příchodů Rayleighových vln k lokalizaci emisních událostí, tak může dojít chybě.

Zajímavé zjištění plyne z porovnání postupu vln opačným směrem. Ukazuje se, že i v těchto nestacionárních úlohách platí pro posuv kolmý k povrchu princip reciprocity – lze navzájem zaměnit buzení a snímání. Shodu potvrzují i experimenty. Ale průběhy rovnoběžné s povrchem a napětí HMH se obecně liší. Výsledek připomíná Maxwellovu větu o symetrii matice příčinkových koeficientů při statickém řešení prutových nosníků. Bylo by zajímavé exaktně ověřit, zda lze Maxwellovu větu zobecnit i pro 3D dynamický nestacionární případ.

Obrázky 7 a 8 zobrazují sled časových průběhů posuvů kolmých k povrchu pro jednotlivé uzly na povrchu válce na přímé trase mezi buzením snímačem. Obrázky odpovídají válci s osazením 10 mm, každý pro postup vln jedním směrem. Vpravo vždy vidíme plochou trojúhelníkovou oblast, kterou protíná čelo dilatační vlny (při této hrubé diskretizaci není patrné). Před ním je plocha ještě nezasazená vlnovým dějem. Výrazné je až čelo Rayleighovy vlny, které je ale přechodem přes osazení značně potlačeno. Přechodem směrem „nahoru“ téměř zaniká. Po přechodu vln směrem „dolů“ je dobře patrný odraz od osazení. S rostoucí výškou osazení klesá jeho průchodnost pro Rayleighovy povrchové vlny, ačkoliv méně rapidněji než pro osazené hranoly, [9], [11]. Zajímavý je mírně snížený svislý posuv horní hrany osazení při postupu vln směrem „nahoru“ a naopak.Zvlnění v levé části obrázků je dáno absencí vysokofrekvenčních složek spektra. Odrazy od podstavy válců nejsou pozorovatelné.

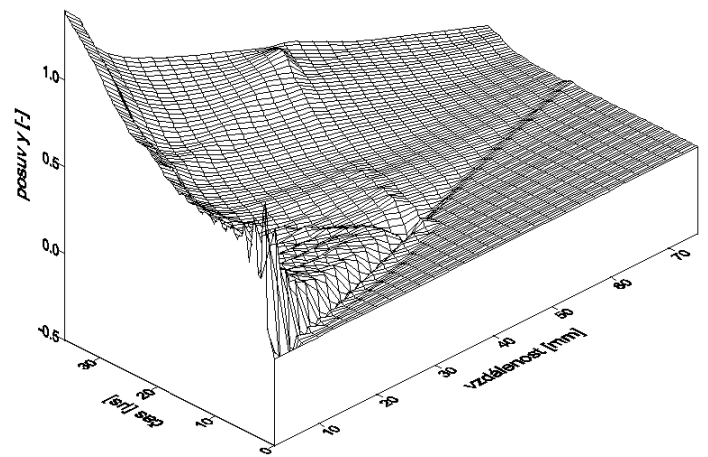
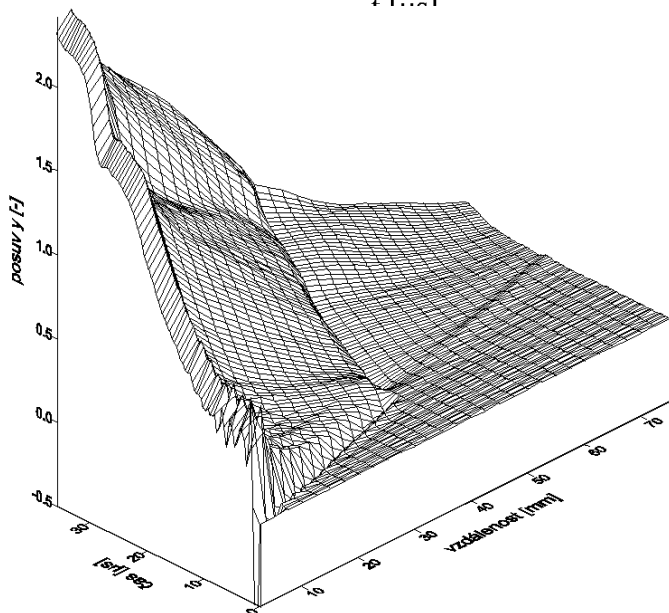
K dispozici jsou i animace těchto průběhů, kde díky dynamickému měřítku posuvů lze dobře pozorovat, jak jednotlivá vlnová čela postupují. To dává další informace, které jen z průběhu v místě snímače často nelze získat. Např. podle směru postupu poznáme, zda-li se jedná o primární vlnu nebo o odraz.



Obr. 2 až 6 (zleva shora) Porovnání změřených a vypočítaných časových průběhů radiálního posuvu na tělesech s osazením 0; 1; 2,5; 5 a 10 mm.

Obr. 7. (dole) Prostorové rozložení časových průběhů radiálního posuvu na tělese s osazením 10 mm při postupu vln přes osazení směrem „dolu“.

Obr. 8. (vlevo dole) Prostorové rozložení časových průběhů radiálního posuvu na tělese s osazením 10 mm při postupu vln přes osazení směrem „nahoru“.



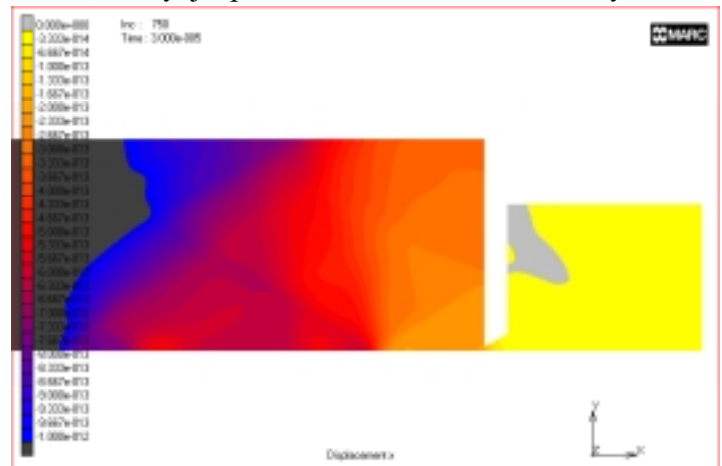
4. VLIV PŘÍTOMNOSTI SNÍMAČE NA MĚŘENOU VELIČINU.

V této části budeme řešit nestacionární úlohu modelující těleso společně se snímačem a pak bez něj a výsledky navzájem porovnáme. Navíc provedeme porovnání s experimentem.

Aby bylo možno použít menší prvky a dosáhnout vyšší přesnosti, řešíme úlohu rotačně symetrickou. Model tvoří 74.000 2D 4-uzlových prvků o hraně 0,25 mm. Počítalo se 1250 čas. kroků $\Delta t = 0,04 \mu s$. Tento model respektuje frekvence do cca 10 MHz. Válec je buzen axiálně, jednotkovým skokem síly na jedné své základně, snímač leží na druhé. Svoji přítomností zpětně ovlivňuje pohyb válce, takže i pokud posuv kolmý k povrchu jinak přesně změříme, měl by se lišit od průběhu bez snímače, který je počítán v druhé úloze. Každý výpočet trval přes 2 týdny strojového času.

Na obr. 9 na rozložení ax. posuvů vidíme, jak se rozruch šíří z měřeného tělesa do snímače. Zajímavé je, že v tomto čase dochází k malému vychýlení části setrvačné hmoty snímače proti směru budící síly.

Obr. 9. Rozložení axiálního posuvu na přechodu válce a snímače v čase 30 μs .

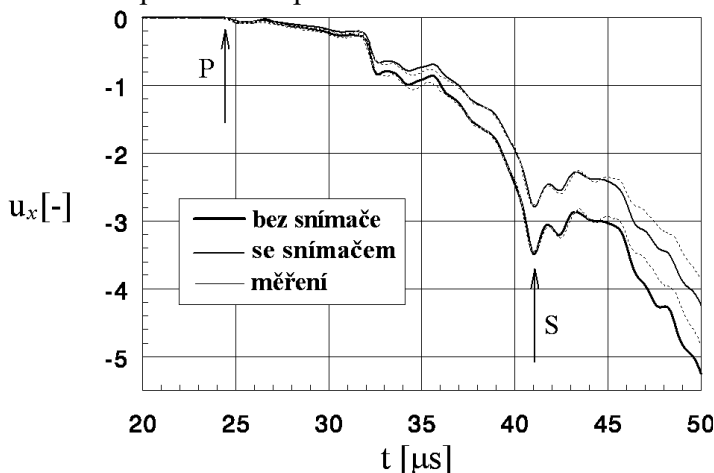


Válec je modelován ve svislé poloze a snímač spočívá svojí vahou na horní podstavě. Pro zvolenou budící sílu zrychlení kontaktní plochy nedosáhne gravitačního zrychlení a nedojde k odlehnutí. Nemusíme uvažovat kontakt, což MKP model zjednodušuje.

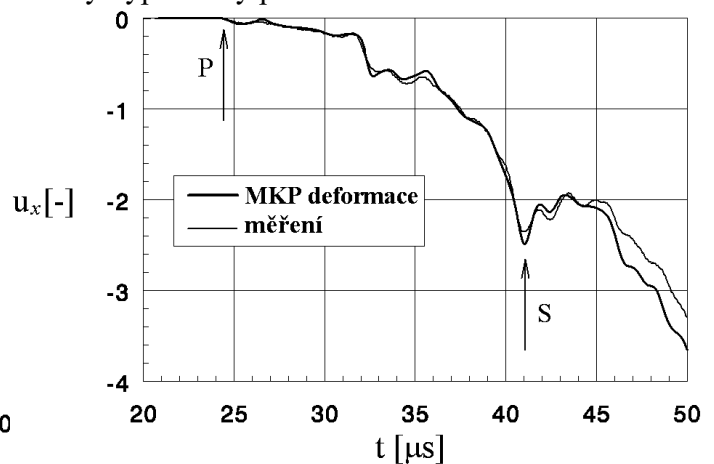
Na obr. 10 je porovnání průběhu posuvu kontaktní plochy snímače a tělesa při zpětném ovlivnění snímačem a bez něj. Průběhy se tvarově velmi podobají, ale velikostí se liší o 25 % ! Předpokládám, velikost odchylky není dána jen parametry snímače, ale závisí i na místě měření. Budeme-li měřit na „méně tuhém“ místě, např. na hraně, může být odchylka jiná. To je poměrně vážný problém, kterým je třeba se zabývat zvláště u absolutních měření.

Výsledky byly ověřeny i experimentálně. Na obr. 10 je porovnán průběh axiálního posuvu kontaktní plochy se snímačem a bez něj s výsledkem měření. Měřený průběh je jeden, jen 2x v různém měřítku. Vidíme dobrou shodu s oběma výpočty. Vzhledem k jejich tvarové podobnosti ale nelze prostým pohledem posoudit, který průběh se s měřením shoduje lépe.

Obr. 11 porovnává změřený průběh posuvu kontaktní plochy s vypočítanou deformací piezoelementu, která fyzikálně správněji vystihuje naměřený průběh. Deformace se liší od experimentu oproti očekávání mírně více než samotný vypočítaný posuv.



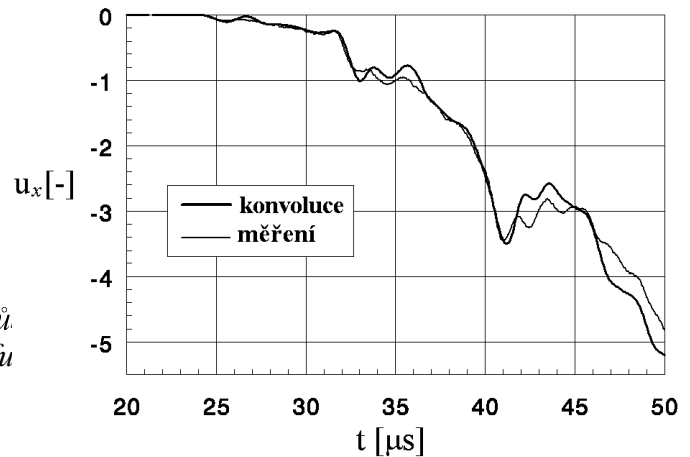
Obr. 10. Porovnání časového průběhu axiální výchylky kontaktní plochy tělesa a snímače pro případ se snímačem a bez něj s výsledkem měření. „P“ odpovídá příchodu čela dilatační vlny, „S“ čela smykové vlny.



Obr. 11. Porovnání změřeného průběhu axiálního posuvu kontaktní plochy snímače a tělesa s deformací piezoelementu.

Obrázek 12 porovnává změřený průběh axiálního posuvu s konvolucí přenosové funkce snímače a MKP výpočtu bez snímače. Zde je shoda nejnížší, ačkoliv podle pokusů s konvolucí na odezvě poloprostoru a tlusté desky, např.[10], bychom mohli očekávat mírné zlepšení.

Obr. 12. (vpravo) Porovnání změřeného průběhu axiálního posuvu s konvolucí přenosové funkce snímače a MKP výpočtu bez snímače.



5. ZÁVĚR.

Výsledky potvrzují (viz také [9], [11] a [12] pro jiné typy těles), že i relativně malé osazení (nebo vrub) je překážkou pro šíření Rayleighových povrchových vln v obou směrech. To může při použití metody akustické emise způsobit chybnou lokalizaci zdroje AE.

Vypočítané i naměřené průběhy posuvů kolmých k povrchu pro opačný směr šíření vln jsou téměř shodné, což připomíná Maxwellovu větu pro statické řešení prutových nosníků. Bylo by zajímavé tento jev ověřit exaktně.

Shoda numerických výpočtů a experimentálních měření je relativně dobrá a odpovídá technickým možnostem. Vzhledem k vysokým požadavkům nestacionárních MKP výpočtů na hardware se zatím není možné u 3D modelů frekvenčně přiblížit k možnostem měření.

Ukázalo se, že vliv přítomnosti snímače na výsledky měření posuvu kolmého k povrchu není zanedbatelný a že zejména při absolutních měřeních je nutno s ním počítat.

Příspěvek navazuje na studium šíření elastických vln přes různě velká osazení a vruby na hranolu. Dále probíhají výpočty modelu tlustostěnné nádoby a hranolu s otvorem. Připraveny jsou kruhové desky s otvory. Cílem celého úkolu je blíže poznat zákonitosti šíření elastických vln v tělesech a konstrukčních, zejména pro potřeby aplikace metody AE.

6. LITERATURA.

- [1] Proctor T. M. Jr.: *An Improved Piezoelectric Acoustic Emission Transducer.*, J.Acoust. Soc. Am., vol. 71, pp. 1163-1168, No. 5, 1982.
- [2] Hora P. & al.: *Nové metody vyhodnocování signálů akustické emise. Závěrečná zpráva o řešení grantu GAČR č.101/94/0971*, Plzeň, Západočeská univerzita, 1997.
- [3] Morávka Š.: *Porovnání analytického řešení nestacionární rázové napjatosti kontinua s výpočtem pomocí MKP.*, Strojnícky čas.49, č.6, str.406-425, Bratislava, 1998.
- [4] Morávka Š.: *Testování možností modelování nestacionárního šíření napěťových vln metodou konečných prvků.* Národní konference *Inženýrská mechanika '98*, str. 489-494, Svratka, květen 1998.
- [5] Morávka Š.: *Analýza širokopásmového snímače napěťových vln.* Kolokvium *Diagnostika a aktivní řízení '98*, str.29-34, Brno VUT, listopad 1998.
- [6] Morávka Š.: *Společné posouzení vedlejších účinků časové a prostorové diskretizace při nestacionárním zatížení.* Národní konference *Inženýrská mechanika '99*, str. 391-396, Svratka, květen 1999.
- [7] Morávka Š.: *Disperze vln na MKP modelu způsobené současně časovou a prostorovou diskretizací kontinua.* Konference *Výpočtová mechanika '99*, str. 255-261, Západočeská univerzita, Nečtiny, říjen 1999.
- [8] Morávka Š.: *Side Effect of Simultaneous Spatial and Temporal Discretization of a Continuum Under Transient Load.* In: *Proceedings of University of West Bohemia 1999*, page 127-135, Plzeň, April 2000.
- [9] Morávka Š.: *The Elastic Wave Propagation over the Shape Transitions of Bodies.* International Conference *Engineering Mechanics 2000*, Svratka, page 133-138, Czech Republic, May 2000.
- [10] Morávka Š.: *The Analysis of the Broadband Transducer of Strain Waves*, 38th International Conference *EAN 2000*, page 199-206, Třešť, Czech Republic, June 2000.
- [11] Morávka Š.: *Šíření elastických vln v prizmatických tělesech se strmými změnami tvaru.* 16.konference s mezinárodní účastí, *Computational Mechanics 2000*, str. 283-290, Nečtiny, Czech Republic, October 2000.
- [12] Morávka Š.: *Modelování šíření napěťových vln pro účely zpětné rekonstrukce zdroje akustické emise,* Závěrečná zpráva o řešení grantu GAČR č.101/97/P007, Plzeň, Západočeská univerzita, leden 2001.