

THE ELASTIC WAVE PROPAGATION OVER THE SHAPE TRANSITIONS OF BODIES.

Š.Morávka, P.Hora

Summary: Due to using non-destructive diagnostics method – the acoustic emission- there is required the best knowledge about the rules of the elastic wave propagation in bodies. So this work treats the elastic wave propagation in the basic construction elements of structures. The samples with the most common shape transitions are used – here some experimental bodies with the shoulders (like a stair shape) at various sizes. The results of the analytical computations, numerical simulations and experimental results are verified and compared mutually. The generalized ray theory - one from the analytical methods - is applied. For the extensive numerical simulations the finite element method (implemented in software MARC/MENTAT) is used. The transient piezoceramics transducers are employed for the experimental measuring.

Úvod.

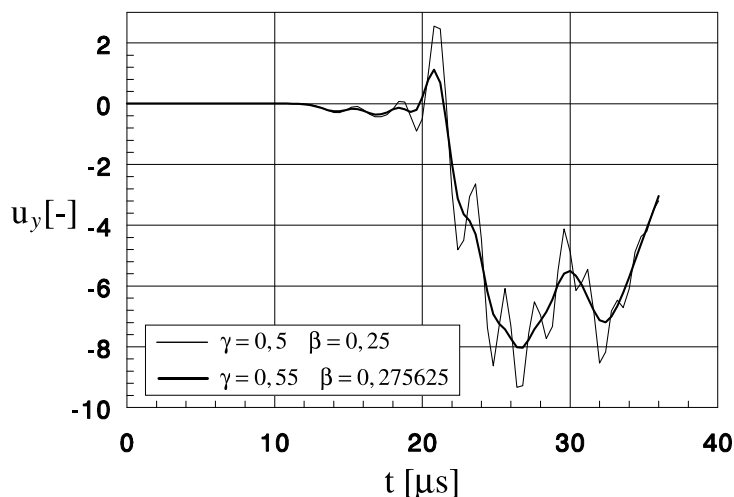
Akustická emise je nedestruktivní metoda sledující děje v materiálu mechanicky či tepelně namáhané konstrukce. Informace o těchto procesech jsou nesené elastickými vlnami, které jsou snímány snímači na povrchu diagnostikovaného tělesa nebo konstrukce. V současné době jsme schopni analyzovat jen relativně malou část této informace. Poměrně spolehlivě lze registrovat četnost emisních událostí v průběhu zatěžování. Dále, zejména u geometricky jednodušších těles, lze poměrně spolehlivě lokalizovat zdroj emise. Ostatní informace, zejména o charakteru emisní události, jsou zjišťovány nepřímou – z intenzity signálu, jeho náběhu, frekvenční charakteristiky a podobně. Nejmodernější metody, které ještě zdaleka nejsou ve fázi průmyslového nasazení, se snaží zpracovávat získaný signál bez ztráty informace, např. použitím umělé neuronové sítě. Cílem je přesně lokalizovat a charakterizovat zdroje AE časovým průběhem vektoru budící síly nebo tenzoru momentů. Pak bude možno kvalifikovaně posoudit procesy odehrávající se v materiálu, nebezpečí ztráty stability a rozvoje mechanického porušení či určit zbytkovou životnost konstrukce, např. lit. [1]. Pro určení charakteristik zdroje AE je ale nutno signál „očistit“ od vlivu geometrického tvaru tělesa (odrazy od povrchů), eliminovat vliv přenosové charakteristiky použitého snímače (frekvenční charakteristika, citlivost apod.) a vliv elektronického zpracování (frekvenční a časový rozsah, zaokrouhlení atd.).

Tato práce je zaměřena na poznání jednoho z výše uvedených vlivů – a to vlivu tvaru těles na šíření elastických vln. Analyticky, numerickým a experimentálním modelováním stanovujeme Greenovy funkce zkušebních vzorků s charakteristickými konstrukčními prvky. Zde se zaměřujeme na šíření vln v prizmatických tělesech s náhlým přechodem, schodem. Greenovy funkce vyčíslujeme jen ve zvolených bodech těles (kde lze a je vhodné umístit snímače) a jen pro buzení ve zvolených referenčních bodech.

Dr.Ing.Štefan Morávka, E-mail: moravka@ufy.zcu.cz, Ing. Petr Hora, CSc., E-mail: hora@ufy.zcu.cz, oba: Ústav fyzikálního inženýrství, společné pracoviště ZČU Plzeň a ÚT AV ČR Praha, Veleslavínova 11, 301 14 Plzeň, tel.: 019/7236415, fax: 019/7220787.

Použité metody.

Pro zkoumání šíření elastických vln používáme různé metody, které vzájemným porovnáváním verifikujeme. První z metod je analytický výpočet vycházející z exaktních rovnic kontinua - metoda zobecněného paprsku. Je založena na metodě integrálních transformací. Pro stanovení inverzní Laplaceovy transformace nevyužívá sumace přes rezidua, ale změnou integrační cesty je možno stanovit Laplaceův předmět přímou inspekcí. Její předností je absence jakýchkoli artefaktů před příchodem prvního čela vlny a lze ji výhodně použít v případě blízkého pole a krátkých časů, lit. [2], [3].



Obr.1 Účinek numerického tlumení volbou koeficientů Newmarkovy integrační metody.

vyšších frekvencí. Velikost konečných prvků (hrana 2,5 mm) a časového kroku ($\Delta t = 4 \cdot 10^{-7}$ sec.) byly voleny ve vzájemné relaci tak, aby výpočet v limitním případě, kdy na délku vlny připadají dva prvky, respektoval frekvenci do cca 1,25 MHz. Pro kvalifikovanou volbu parametrů výpočtů se využívá dřívějších znalostí o vedlejších jevech způsobených současně účinky časové i prostorové diskretizace. Podrobněji v [5].

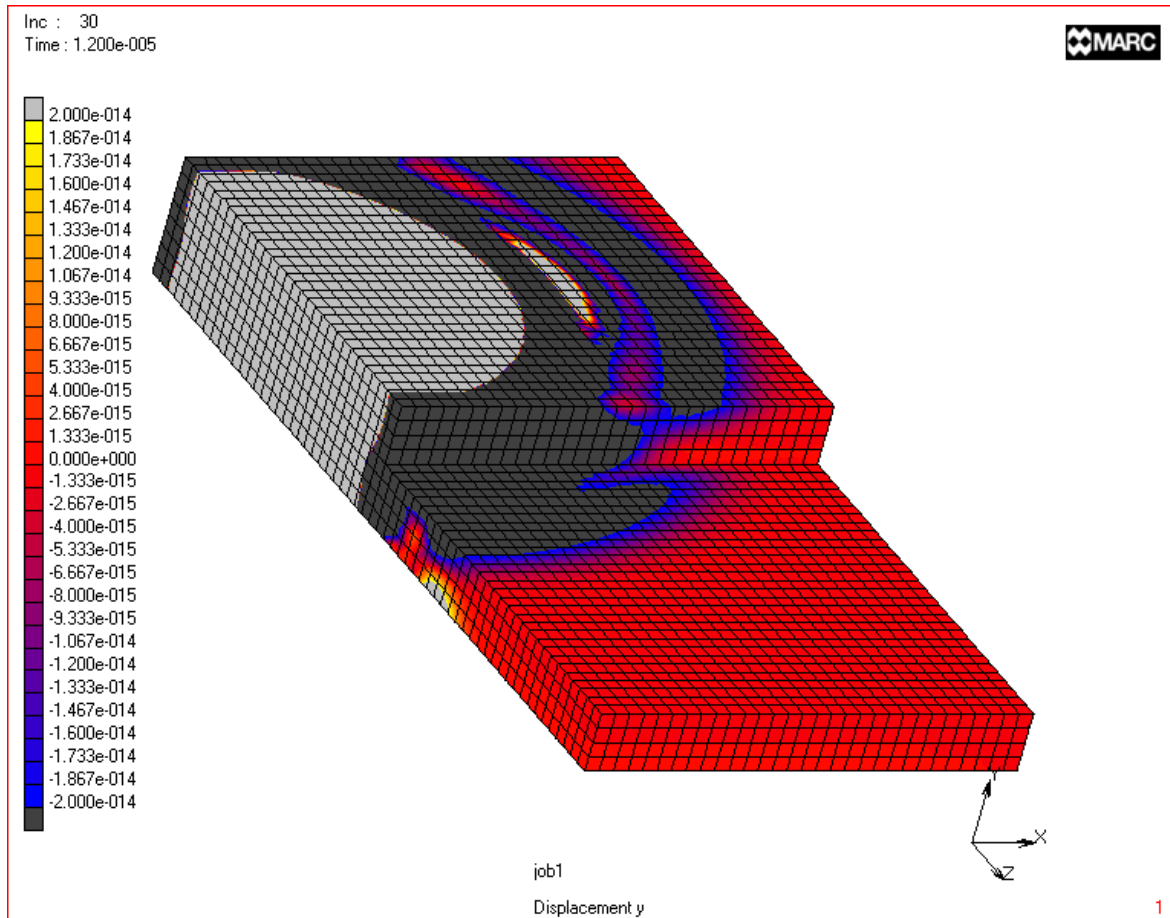
Pro experimentální měření byl použit laboratorní nerezonanční piezoelektrický snímač, zkonstruovaný podle [6]. Vlastnosti různých modifikací tohoto snímače již byly podrobně zkoumány, např. [7] a [1]. Měření bylo realizováno na zapisovači tranzientních jevů MAURER-ADAM s maximální vzorkovací frekvencí 20 MHz a rozlišením 10 bitů. Jako zdroj silového buzení jednotkovým skokem byl použit lom křemenné kapiláry.

Tyto práce jsou prováděny na několika sadách zkušebních těles s různou geometrií a s tvarovými přechody běžnými u mnoha konstrukcí. Zde uvádíme výsledky z hranolů 150x150x20 mm, které jsou na jedné polovině osazeny o 0, 1, 2,5, 5 a 10 mm. Na obr.2. je uveden jeden příklad vzorku s osazením 10 mm. Zobrazena je symetrická polovina vzorku.

Ukázky výsledků.

Vzorky osazených hranolů jsou buzeny silově jednotkovým skokem uprostřed neosazené části. Snímač je umístěn uprostřed osazené části. Úloha je tedy symetrická okolo roviny v níž leží budící síla a osa snímače. Na obrázku 3 jsou pro vzorek bez osazení uvedeny časové průběhy posuvu kolmého k povrchu - výsledky MKP, měření a analytický průběh. Vidíme zde několik zajímavých skutečností. MKP výpočet kromě mírného zavlňení vůbec nezachycuje čelo Rayleighových vln. Není to chyba, ale důsledek filtračního efektu MKP. Pro daný model je mezná frekvence dilatačních vln cca 1,25 MHz.

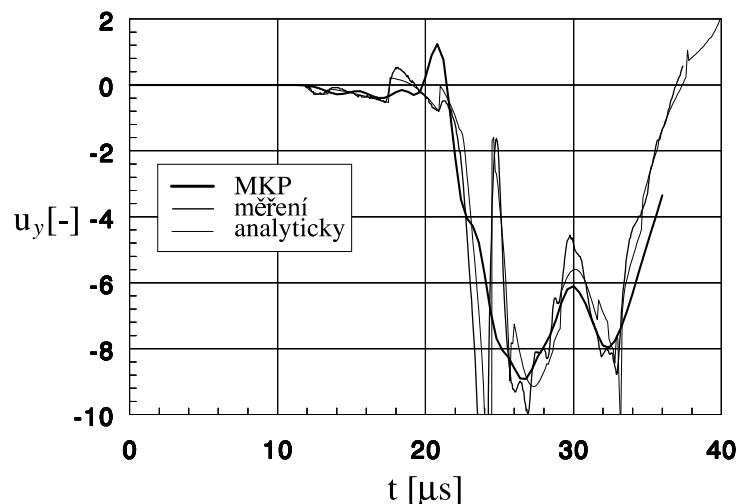
Pro numerické simulace je použita deformační formulace metody konečných prvků v software MARC/MENTAT. Tělesa jsou modelována cca 11000 až 14500 prostorovými, osmi-uzlovými, izoparametrickými prvky. Je použita Newmarkova metoda přímé časové integrace s koeficienty $\beta = 0,275625$ a $\gamma = 0,55$, které zaručují její bezpodmínečnou numerickou stabilitu a současně zavádějí slabé numerické tlumení. Vhodnost této volby byla diskutována a testována v [4]. Z obrázku 1 je patrné, jak tlumení eliminuje rušivý vliv



Obr.2 MKP model „schodu“ s rozložením posuvů ve směru osy „y“ v čase $t = 12 \mu\text{sec}$.

Frekvenční analýza změřeného průběhu však ukazuje, že čelo Rayleighových vln je tvořeno frekvencemi okolo 3 MHz. Pravděpodobně také z důvodu absence vyšších frekvencí vzniká neshoda i v oblasti před tímto čelem. MKP výsledky jsou hladké a ani nemohou obsahovat strmé změny. Na konferenci na 2D případě ukážeme, jak se tato vlastnost změní, použijeme-li menší prvek a časový krok.

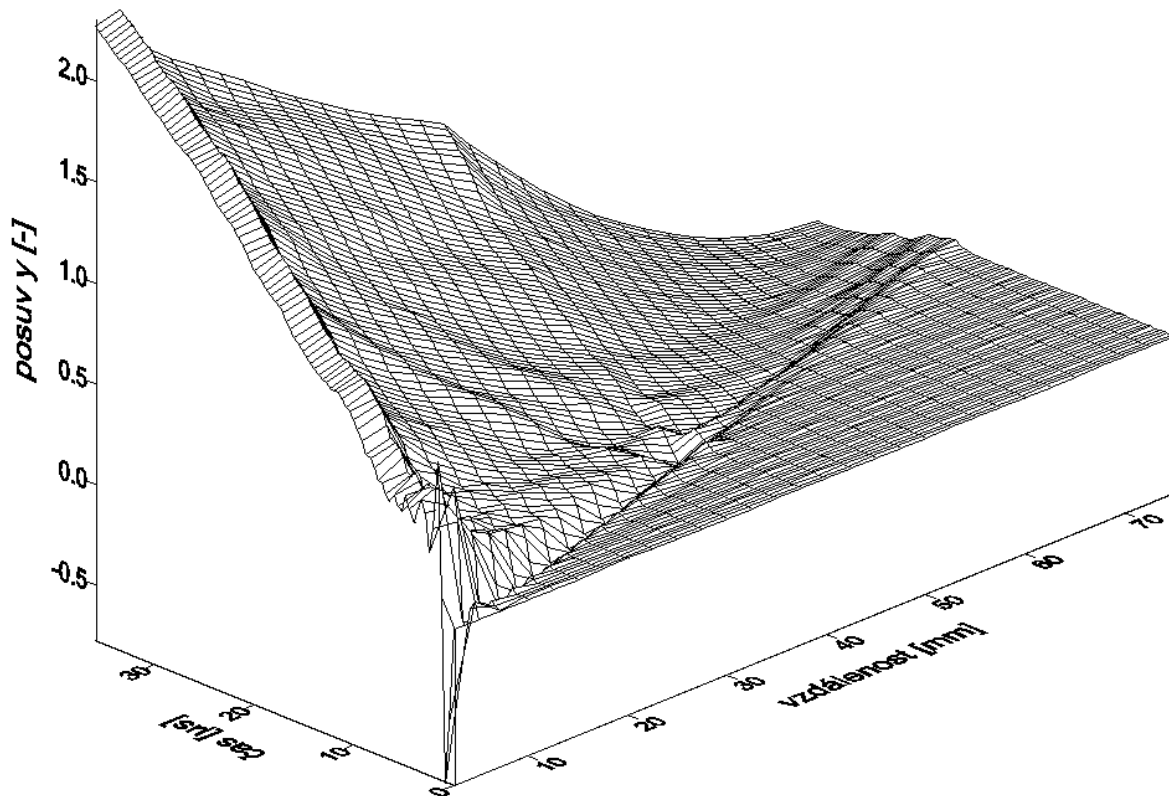
Na obrázku 4 je pro těleso s osazením 10 mm uvedeno rozložení časových MKP průběhů posuvu kolmého



Obr.3 Porovnání výsledků paprskové metody, MKP, a měření na destičce bez osazení.

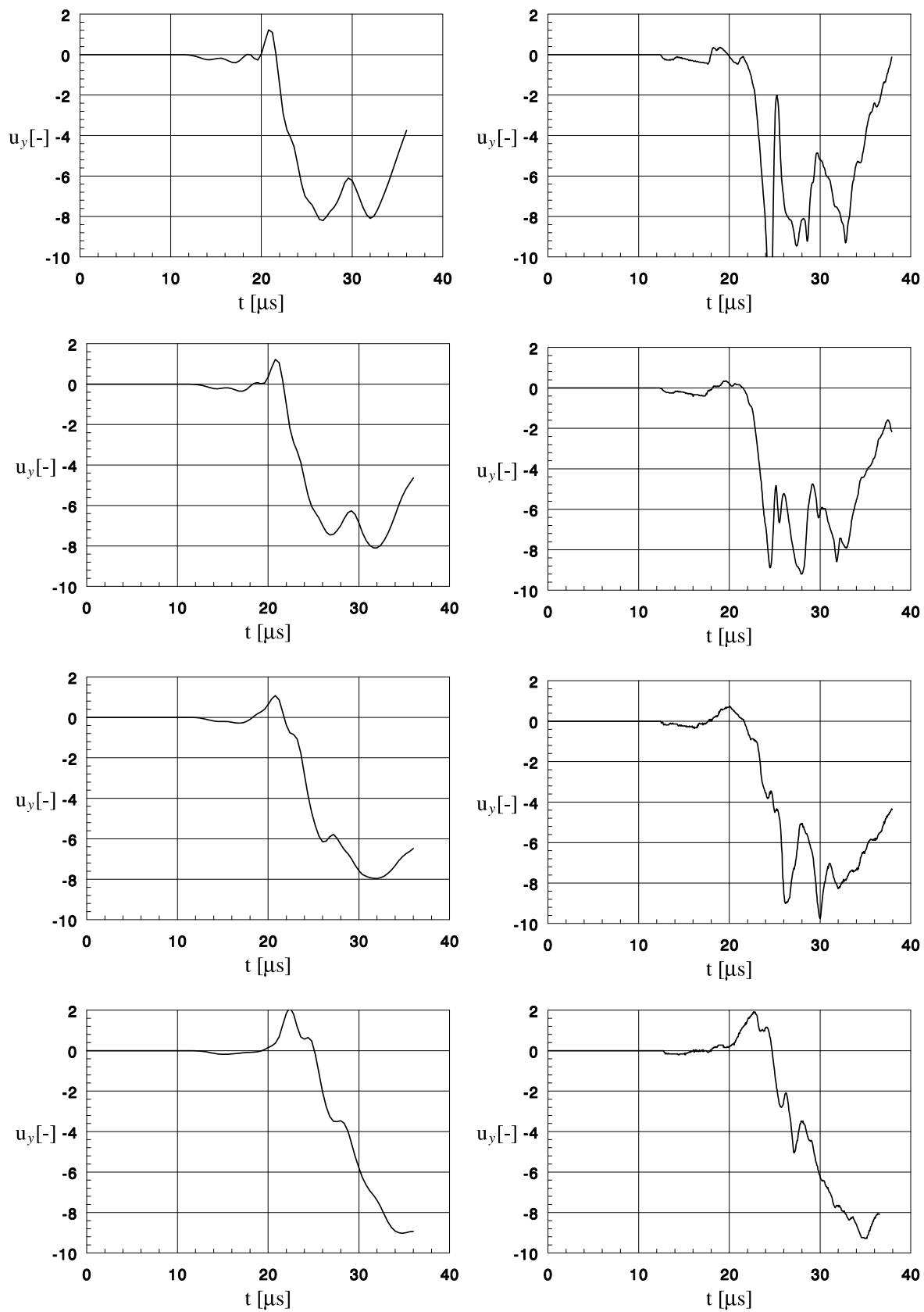
k povrchu od místa buzení až po snímač. Plochá trojúhelníková oblast ještě nezasažená vlnovým dějem je výrazně ohraničena čelem dilatační vlny. Po přechodu osazení (37,5 mm od místa buzení) toto čelo zvolna zaniká. Na osazené části se pak objevuje znovu, ale časově zpožděné. Jde o nepředpokládaný jev, jako by se čelo dilatační vlny nešířilo celým objemem vzorku, ale „stékalo“ po povrchu schodu. Být tomu tak nemůže, protože vrchol

i pata schodu jsou téměř stejně vzdálené od zdroje buzení. Dále je obrázku patrný mírné zvýšený svislý posuv horní hrany osazení. Zajímavý je také odraz čela dilatační vlny od čelní plochy osazení. Za ním se rýsuje ještě jedno s ním rovnoběžné vlnové čelo, které je jakoby tímž odrazem, ale se zatím nevysvětleným zpožděním popsáním výše. V oblasti blízko snímače se budují čela odražených dilatačních vln. Na obrázku není patrné čelo smykových vln. Také nevidíme Rayleighovy povrchové vlny ani jiné ostré přechody, což je dáno ještě poměrně hrubou diskretizací kontinua a času.



Obr.4 Rozložení časových průběhů svislého posuvu na tělese s osazením 10 mm.

Poslední ukázkou je na obrázku 5 sada průběhů posuvů kolmých k povrchu v místě snímače u vzorků s 1, 2,5, 5 a 10 mm osazením (shora). Vlevo jsou průběhy vypočítané MKP, vpravo odpovídající naměřené průběhy. Odmyslíme-li si z experimentálních dat vysokofrekvenční ostré přechody, pak se průběhy tvarově shodují velmi dobře. U prvních dvou vzorků (malá osazení) je přibližně v čase $t=24 \mu\text{s}$ dobře vidět naměřené čelo Rayleighovy vlny, zatímco na MKP průbězích je zde jen slabé zavlnění. Na vzorcích s vyšším osazením již čelo Rayleighovy vlny není patrné. Osazení je v tomto směru překážkou pro šíření Rayleighových vln. To může způsobit chybnou lokalizaci zdroje AE. Zajímavé bude posoudit chování Rayleighových vln postupujících opačně – tedy z osazené části do neosazené. To je zatím předmětem zkoumání. Lokalizovat ostatní vlnová čela není vůbec jednoduché – jak se na první pohled zdá. Odraz čela dilatační vlny od obou čel vzorku (čelo osazené a neosazené části) by se měl objevit cca v čase $t=24,7 \mu\text{s}$, kde ale splývá s čelem Rayleighovy vlny. Pokud ovšem skutečně dochází přechodem přes osazení ke zpoždění dilatačních vln, pak se tato čela rozfázují a odraz by mohl být vidět u osazení 5 a 10 mm. V čase $t=27,6 \mu\text{s}$ by ke snímači měla dorazit čela dilatačních vln odražených od boků vzorku. Tento jev se zdá být jak na experimentech tak na MKP výsledcích patrný. Další zavlnění lze identifikovat jen velmi spekulativně. Navíc se zdá, že některé vrcholky křivky se s rostoucí velikostí osazení posouvají a tím se může i jejich pořadí měnit ...



Obr. 5
 MKP a analyticky vypočítaný posuv kolmý k povrchu pro odsazení 1, 2,5 a 5 a 10 mm.

Závěr.

Výsledky zejména ukazují, že i poměrně malé odsazení je překážkou pro šíření Rayleighových povrchových vln, což může způsobit chybnou lokalizaci zdroje AE, kde se právě využívá příchodů čel Rayleighových vln. V důsledku odsazení pravděpodobně dochází ke zpoždění dilatačních vln. Nepodařilo se prokázat žádnou korelaci mezi frekvenčními spektry odezev na jednotkový skok a výškou odsazení.

Úroveň shody analytických výpočtů, numerických simulací a experimentálních měření je relativně dobrá a odpovídá technickým možnostem. Omezující jsou zejména velmi vysoké požadavky nestacionárních MKP modelů na výkon hardware. Přestože se využívají dva výkonné stroje: workstation SGI Octane a PC s Pentiem 450 MHz, stále není možné se frekvenčně přiblížit k možnostem měření.

Příspěvek prezentuje část rozsáhlejšího úkolu, jehož cílem je blíže poznat zákonitosti šíření elastických vln v tělesech, zejména pro potřeby aplikace metody AE. Práce bude dále pokračovat studiem šíření elastických vln na dalších konstrukčních prvcích. Nyní probíhají výpočty a měření těles opatřených tenkým zářezem (vrubem) o různých hloubkách. Dále se budeme zabývat rotačními tělesy, řeší se osazené válce a jsou připraveny kruhové desky s otvory. Probíhají výpočty modelu tlustostěnné nádoby a hranolu s otvorem. To jsou ale samostatné problémy, o kterých může být referováno jindy.

Literatura.

- [1] Hora P. & al.: Nové metody vyhodnocování signálů akustické emise. *Závěrečná zpráva o řešení grantu GAČR č.101/94/0971*, Plzeň, Západočeská univerzita, 1997.
- [2] Pao Y.-H., Gajewski R. R.: The Generalized Ray Theory and Transient Responses of Layered Elastic Solids. In: *Physical Acoustics*, Edited by Warren P. Mason and R. N. Thurston, Vol. 13, Academic Press New York, 1977.
- [3] Hora P.: Teorie zobecněného paprsku a analýza tranzientních vln ve vícevrstevném pevném tělese., *Výzkumná zpráva 114 VP, ÚTSSK ČSAV*, Plzeň, 1992.
- [4] Morávka Š.: Porovnání analytického řešení nestacionární rázové napjatosti kontinua s výpočtem pomocí MKP., *Strojnícky čas.* 49, č.6, str.406-425, Bratislava, 1998.
- [5] Morávka Š.: Společné posouzení vedlejších účinků prostorové a časové diskretizace při nestacionárním zatížení., In: *Národní konference Inženýrská mechanika '99*, Svratka, 1999.
- [6] Proctor T. M. Jr.: An Improved Piezoelectric Acoustic Emission Transducer., *J.Acoust. Soc. Am.*, vol. 71, pp. 1163-1168, No. 5, 1982.
- [7] Morávka Š.: Analýza širokopásmového snímače napětových vln. *Kolokvium Diagnostika a aktivní řízení '98*, Brno, VUT, 1998.

Práce byla částečně podporována projektem MŠMT č. J23/98:230000009, Grantovou agenturou ČR prostřednictvím grantu č.101/97/P007: „Modelování šíření napětových vln pro účely zpětné rekonstrukce zdroje akustické emise“ a pilotním projektem ÚT AV ČR č. PP4/76U“ "Analýza disperzních jevů při ultrazvukovém nedestruktivním hodnocení materiálů".