



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

MOŽNOSTI SIMULACE ŠÍŘENÍ
VYSOKOFREKVENČNÍHO VLNĚNÍ
TENKOSTĚNNÝM PANELEM

ANALYSIS OF ULTRASONIC WAVE PROPAGATION USING FINITE ELEMENT MODELLING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN SKŘIVÁNEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MICHAL MALIŠ, PH.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Skřivánek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Možnosti simulace šíření vysokofrekvenčního vlnění tenkostěnným panelem

v anglickém jazyce:

Analysis of Ultrasonic Wave Propagation Using Finite Element Modelling

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Simulace šíření ultrazvukových vln je plánováno při vývoji komplexního systému Structure Health Monitoring (SHM) draku leteckých konstrukcí. Naplní práce je v prvním kroku vytvoření banky dostupné literatury o tématu a stručná reserse. Dalším krokem bude simulace šíření vlny na tenkostěnném plechu pomocí MSC.Patran/Nastran/Dytran

Cíle bakalářské práce:

1. Vytvoření banky dostupné literatury
2. Popis problému
3. Popis vhodného postupu modelování
4. Aplikace na tenkostěnném panelu

Seznam odborné literatury:

Ahmed N.M: A Study of Guided Ultrasonic Wave Propagation Characteristics in Thin Aluminium Plate for Damage Detection Master Science Degree in Civil Engineering, The University of Toledo, 2014

Han SeJin: Finite Element of Lamb Waves Acting Within a Thin Aluminium Plate, US Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 2007

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Mališ, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 19.11.2014

L.S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá mechanickým vlněním v pružném materiálu, konkrétně Lambovými vlnami, které jsou využitelné při SHM. V první části je popis vlastností Lambových vln: rychlost šíření, jednotlivé módy a zejména disperze. Pak následuje popis provedených simulací pomocí programů MSC Nastran/Patran /Dytran.

Klíčová slova:

Lambovy vlny, metoda konečných prvků

ABSTRACT

The thesis deals with mechanical waves in elastic material, focusing on Lamb waves, which are useful in SHM. In the first part there is a description of Lamb Waves properties: wave velocity, specific modes and especially dispersion. After that, there are described simulations, which were performed using MSC Nastran/Patran/Dytran software.

Klíčová slova:

Lamb waves, finite element analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SKŘIVÁNEK, J. *Možnosti simulace šíření vysokofrekvenčního vlnění tenkostěnným panelem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 30 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Mališ, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Michalu Mališovi, Ph.D. za možnost vypracovat tuto bakalářskou práci a zejména bych chtěl poděkovat svým rodičům za jejich nesmírnou podporu.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury uvedené v seznamu zdrojů.

V Brně dne 29.5.2015

.....
Jan Skřivánek

OBSAH

ÚVOD	11
1 VLNĚNÍ V PRUŽNÉM MATERIÁLU	12
1.1 Šíření vlnění v pružném materiálu	12
1.2 Podélné vlnění	12
1.3 Příčné vlnění	13
1.4 Povrchové vlnění	13
1.5 Deskové vlnění	13
2 LAMBOVY VLNY	14
2.1 Fázová a grupová rychlost	14
2.2 Symetrické a antisymetrické módy	15
2.3 Disperzní křivky	15
3 SIMULACE POMOCÍ MKP	19
3.1 Volba řešiče	19
3.2 Model	19
3.3 Určení velikosti prvků	20
3.4 Určení časového kroku	20
3.5 Výsledky simulací	21
3.6 Trajektorie bodu B	24
3.7 Zobrazení symetrického a antisymetrického módu	25
ZÁVĚR	27
Seznam zdrojů	29
Seznam použitých symbolů a zkratek	30

ÚVOD

Structural Health Monitoring (SHM) je formující se technologie, která umožňuje najít a kvantifikovat poruchy v materiálu. SHM je zaměřený na sledování určitého systému v průběhu času pomocí periodických měření řady senzorů a analýzu získaných dat k určení stavu systému. Umožňuje snížit náklady na pravidelné kontroly a opravy a zároveň zvýšit spolehlivost a bezpečnost, což je zvláště důležité v leteckém průmyslu.

Existuje několik přístupů k SHM. Některé metody využívají vibrace ke zkoumání systému na základě frekvenční odezvy. To je výhodné například při zjišťování větších poškození. Pokud jsou ovšem poruchy mnohem menší ve srovnání s velikostí zkoumaného systému, je tato metoda méně spolehlivá, protože je obtížné odhalit pouze drobné změny ve frekvenční odezvě. Pro odhalování menších vad je proto vhodné použít metody, které využívají šíření vlnění v materiálu. Vzhledem k tomu, že vlnová délka je menší než drobné poruchy, je možné odhalit i velmi malé nebo skryté defekty.

Metody využívající vysokofrekvenční vlnění k nedestruktivnímu zkoušení fungují na principu šíření a odražení vlnění v pružném materiálu. Vlnění se v materiálu obvykle vyvolává a snímá pomocí piezoelektrické měniče. Je možné vlny vysílat z jednoho bodu a v tomto bodě pak snímat odrazy nebo snímat jedním měničem vlny vyslané z jiného místa. Sledují se pak změny chování vlnění, ke kterým dochází v důsledku poruch. K vhodnému posouzení těchto změn je ovšem nutné znát vlastnosti vlnění v závislosti na různých typech materiálu a tvarech těles.

Tato práce se zaměřuje na vysokofrekvenční vlnění, které se šíří v tenké homogenní kovové desce. Nejdříve jsou stručně probrány charakteristiky takového vlnění a následně je zkoumána problematika simulace pomocí metody konečných prvků (MKP) v programu MSC.Nastran/Patran/Dytran.

1 VLNĚNÍ V PRUŽNÉM MATERIÁLU

1.1 Šíření vlnění v pružném materiálu

Mechanické vlnění vzniká v důsledku elastické deformace materiálu. Částice vychýlené vnější silou z rovnovážné polohy následkem působení vnitřních sil a setrvačnosti kmitají a předávají svou energii sousedním částicím. Tím se v materiálu šíří vlnění, jehož rychlost je závislá na vlastnostech daného materiálu. Mechanická vlna procházející materiálem pak přenáší kinetickou a potenciální energii na značné vzdálenosti. [1]

Základní druhy vlnění v elastickém materiálu jsou: podélné, příčné, povrchové a deskové. [2]

1.2 Podélné vlnění

Při podélném vlnění částice kmitají ve směru postupu vlny. Rychlost šíření podélného vlnění závisí na Youngovu modulu E a na hustotě materiálu ρ podle následujícího vztahu:

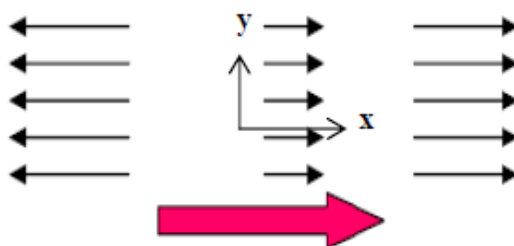
$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.1)$$

Tento vztah byl odvozen pro jednorozměrný prizmatický prut. Rychlost podélného vlnění v obecnějším případě, kdy jsou velikosti tělesa kolmé na směr šíření vlnění výrazně větší než vlnová délka tohoto vlnění, je pak závislá na Lamého konstantách λ a G (což je také modul pružnosti ve smyku). [3]

$$c_{L1} = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (1.2)$$

$$\lambda = \frac{E\mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad (1.3)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (1.4)$$

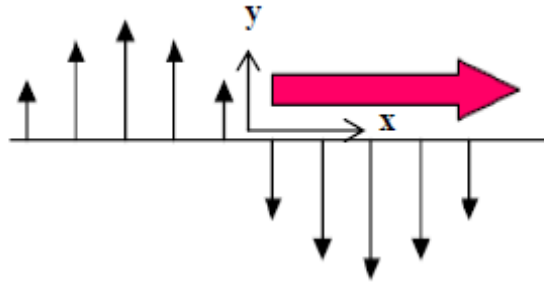


Obr 1.1 Schematické znázornění podélné vlny [2]

1.3 Příčné vlnění

U příčné vlnění částice kmitají ve směru kolmém na směr šíření vlnění. Rychlost vlnění pak závisí na modulu pružnosti ve smyku G a na hustotě materiálu.

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.5)$$



Obr. 1.2 Schematické znázornění příčné vlny [2]

V případě desky je možno příčné vlnění rozdělit do dvou směrů: v rovině desky a ve směru kolmém na desku.

1.4 Povrchové vlnění

Povrchové vlny (také nazývané Rayleighovy vlny) se šíří po volném povrchu nekonečného tělesa, přičemž s rostoucí vzdáleností od povrchu se zmenšuje velikost deformace (významné deformace se vyskytují přibližně do vzdálenosti jedné vlnové délky od povrchu). V izotropním materiálu se částice pohybují po eliptických trajektoriích, které leží v rovinách kolmých na povrch a rovnoběžných se směrem šíření vlnění. [4]

Tyto vlny mají velký význam při nedestruktivních zkouškách. Díky šíření po povrchu těles jsou citlivé na povrchové vady.

1.5 Deskové vlnění

Deskové vlny se šíří v tenké desce (tloušťka d je mnohem menší než dva zbývající rozměry a je řádově srovnatelná s vlnovou délkou). Lambovy vlny, kterým se tato práce věnuje, se vyskytují u desek se dvěma volnými rovnoběžnými povrchy. [5]

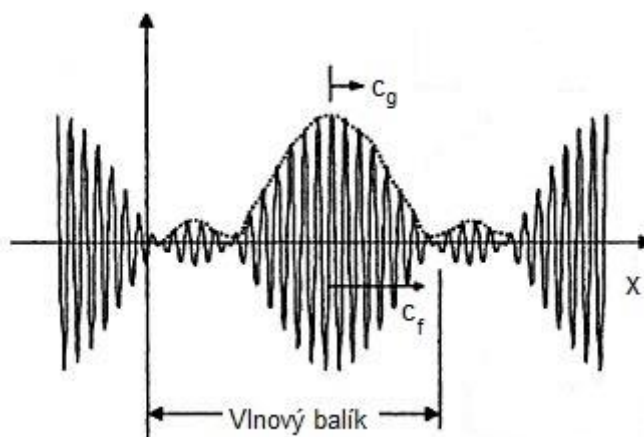
Lambovy vlny jsou komplexní vlny, které vznikají interferencí podélného a příčného vlnění mezi povrchy desky. Částice se podobně jako u Rayleighových vln pohybují po eliptických trajektoriích. Podrobnější popis jejich vlastností je předmětem následující kapitoly.

2 LAMBOVY VLNY

2.1 Fázová a grupová rychlost

Lambovo vlnění je disperzní. To znamená, že rychlost vlny závisí na její frekvenci. Tento fakt je pro další zkoumání zásadní.

U Lambových vln lze rozlišovat fázovou a grupovou rychlost vlnění. Fázová rychlost (c_f) je rychlost, kterou se pohybuje fáze vlnění. Grupová rychlost je rychlost pohybu tzv. vlnového balíku.



Obr. 2.1 Příklad vlnového balíku [upraveno z 6]

Fázovou rychlost je možné vyjádřit v závislosti na frekvenci vlnění (f) a vlnové délce (λ') pomocí následujícího vztahu:

$$c_f = f\lambda' \quad (2.1)$$

Dále je vyjádřena úhlová frekvence (ω) a úhlové vlnové číslo (k):

$$\omega = 2\pi f \quad (2.2)$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda'}$	(2.3)
-----------------------------	-------

Z rovnic 2.1-2.3 lze poté vyjádřit fázovou rychlost (c_f), jako funkci úhlové frekvence a úhlového vlnového čísla [2]:

$$c_f = \frac{\omega}{k} \quad (2.4)$$

Pro grupovou rychlost platí následující vztah [6]:

$$c_g = c_f^2 \left[c_f - (fd) \frac{dc_f}{d(fd)} \right]^{-1} \quad (2.5)$$

Z předchozí rovnice plyne, že pokud by byla fázová rychlost nezávislá na frekvenci, rovnala by se grupové rychlosti. Vzhledem k tomu, že se jedná o disperzní vlnění, rychlosti jsou různé.

Pokud fázová rychlost se zvyšující se frekvencí roste, grupová rychlost je vyšší než fázová. Pokud naopak fázová rychlost s rostoucí frekvencí klesá, vlnový balík se pohybuje rychlostí nižší, než je fázová.

2.2 Symetrické a antisymetrické módy

Lambovy vlny jsou charakteristické tím, že se šíří v rozličných módech, které lze rozdělit do dvou skupin: symetrické (značené S_i) a antisymetrické (značené A_i). Existence a díky disperzi i rychlost šíření jednotlivých módů závisí na tloušťce desky a na frekvenci vlnění. Pro analýzu Lambova vlnění je klíčové jednotlivé módy od sebe odlišit.



Obr. 2.2 Symetrický mód Lambova vlnění [7]



Obr. 2.3 Antisymetrický mód Lambova vlnění [7]

U symetrického Lambova vlnění částice kmitají souměrně podle střednicové plochy desky. Při antisymetrickém vlnění částice nekmitají souměrně podle střednice a z obrázku 2.3 je patrné, že desku ohýbají, zároveň se částice na různých stranách desky vždy pohybují v opačném podélném směru.

2.3 Disperzní křivky

Disperzní křivky jsou klíčové ke zjištění rychlosti vlnění v závislosti na frekvenci a tloušťce desky. Pro daný materiál je možné zobrazit závislost rychlosti šíření vlnění jednotlivých módů buď v závislosti na parametru fd , anebo v závislosti pouze na frekvenci pro konkrétní tloušťku desky.

Disperzní křivky je možné získat řešením Rayleighových-Lambovyých rovnic (také označované jako disperzní rovnice). Jednotlivá řešení daných rovnic pak odpovídají různým módům Lambova vlnění. Pro homogenní izotropní desku s volnými povrchy mají rovnice následující tvar [8]:

Symetrický mód:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = \frac{-4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (2.6)$$

Antisymetrický mód:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = \frac{-(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad (2.7)$$

Platí, že:

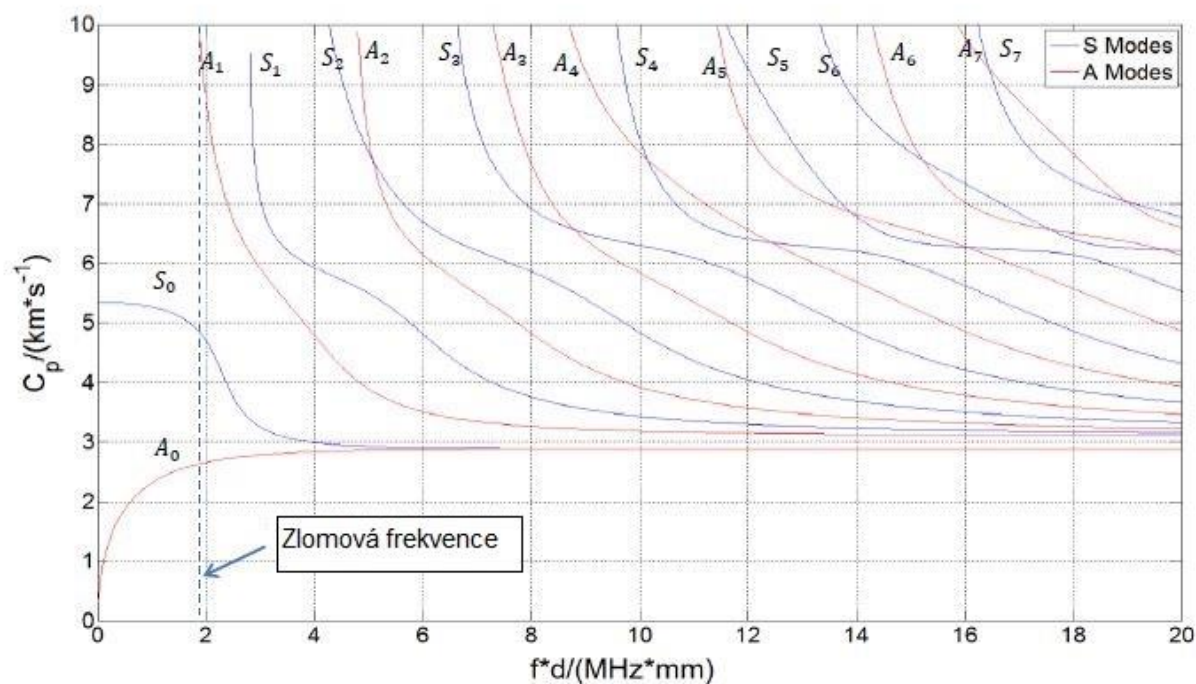
$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_{L1}^2} - k^2 \quad (2.8)$$

$q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2$	(2.9)
--------------------------------------	-------

Pro úhlovou rychlost ω platí vztah (2.2) a pro rychlosti c_{L1} a c_T platí rovnice (1.2) a (1.5). Řešením rovnic (2.6) a (2.7) jsou jednotlivá vlnová úhlová čísla, pomocí kterých lze ze vztahu (2.4) vypočítat fázovou rychlost daného módu. Pomocí fázové rychlosti pak lze pomocí rovnice (2.5) získat grupovou rychlost.

Řešení těchto rovnic je komplikované a provádí se numericky. Výsledné disperzní křivky je možné získat například pomocí programu Waveform Revealer¹ (WFR).

¹ Tento program byl vytvořen Univerzitou Jižní Karolíny v Columbii a je zdarma dostupný z webu univerzity. [12]

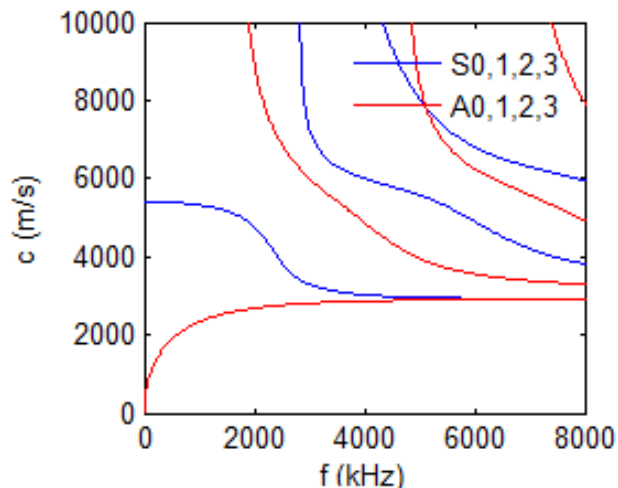


Obr. 2.4 Ukázka disperzních křivek fázové rychlosti [8]

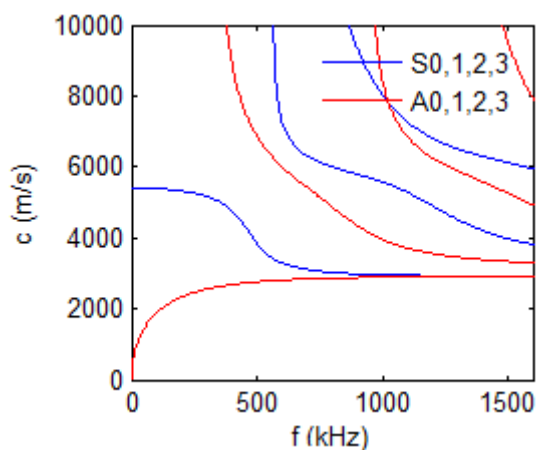
Na obrázku 2.4 jsou zobrazeny disperzní křivky fázové rychlosti (v závislosti na fd). Je na nich vidět existence zlomových frekvencí. Zlomové frekvence jsou takové frekvence, pod kterými se daný mód vlnění v desce nešíří. Pod zlomovou frekvencí módu A_1 se v desce vyskytují pouze módy S_0 a A_0 . Toho lze s výhodou využít při analýze vlnění v desce, kdy s je možné s využitím dostatečně nízké frekvence eliminovat vliv vyšších módů a tím zjednodušit analýzu. Ze studií v [5] také vyplývá, že tyto dva módy jsou nejcitlivější na vady v desce, čehož lze s výhodou využít při SHM.

Pro následující příklady byl zvolen jako vzorový materiál dural EN AW 2024 s následujícími vlastnostmi [9].

E	ρ	μ
73 GPa	2800 kg.m ³	0,33



Obr 2.5 Disperzní křivky pro desku o tloušťce 1 mm



Obr 2.6 Disperzní křivky pro desku o tloušťce 5 mm

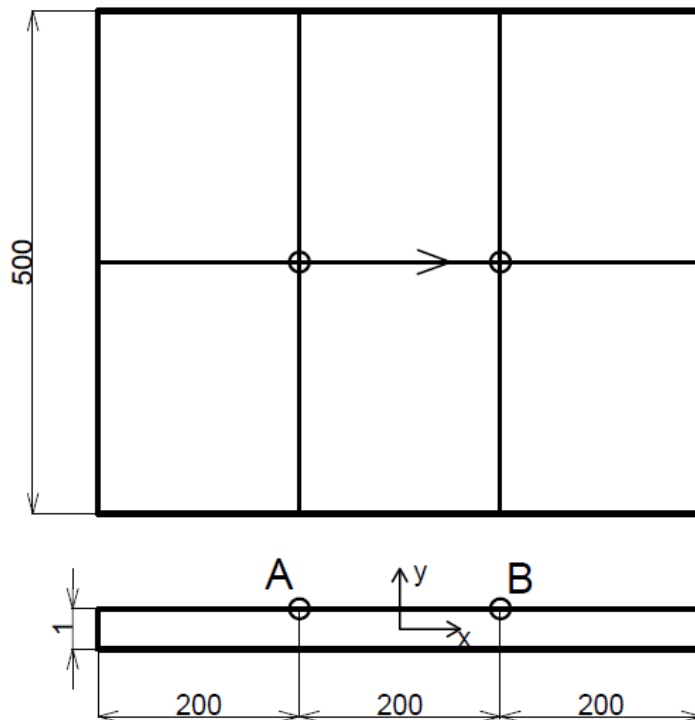
Na obrázcích 2.4 a 2.5 jsou pomocí WFR vykresleny disperzní křivky fázové rychlosti pro desku z EN AW 2024 o dvou různých tloušťkách. Je z nich patrné, že se zvyšující se tloušťkou desky se snižují zlomové frekvence. V prvním případě je zlomová frekvence těsně pod 2 MHz, zatímco u tlustší desky klesla zlomová frekvence až pod 500 kHz. U tenčích desek je tím pádem jednodušší analýza Lambových vln. Je ovšem nutno zmínit, že i vyšší módy lze v některých případech výhodně využít.

3 SIMULACE POMOCÍ MKP

3.1 Volba řešiče

Vzhledem k tomu, že se jedná o dynamický děj, který proběhne ve velmi krátkém čase, je vhodné pro řešení pomocí MKP zvolit explicitní metodu. K výpočtu byl tedy využit program MSC.Dytran. Ke tvorbě modelu je pak využit MSC.Patran.

3.2 Model



Obr. 3.1 Schéma hliníkového plechu pro simulaci

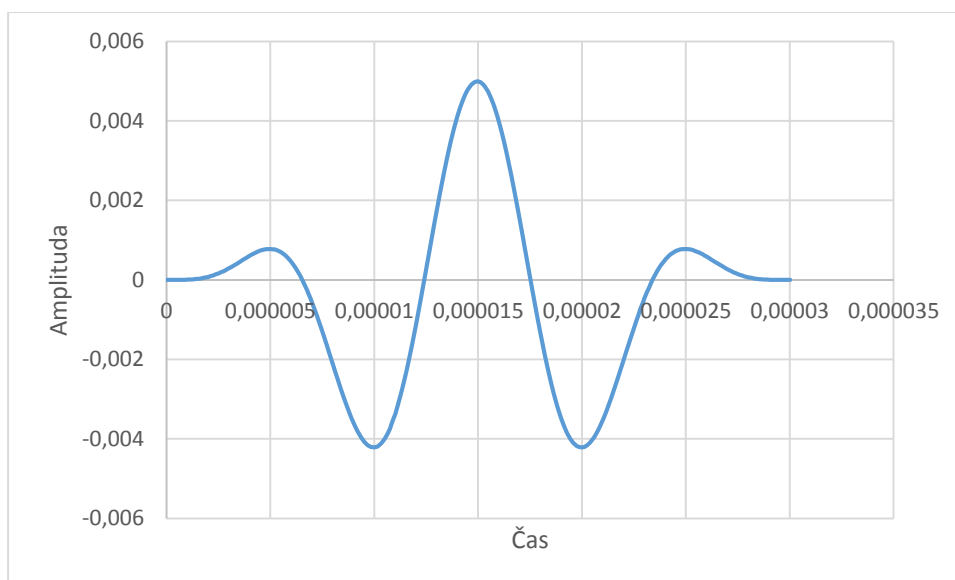
Při simulaci bylo vyvoláno vlnění v bodě A a snímáno v bodě B. Velikost modelu na nastavena tak, aby bylo možné v bodě B sledovat vlnění, aniž by bylo rušeno vlnami odraženými od okrajů desky.

Pro simulaci pomocí MKP byl využit 2D model. Pokud vlna prochází z bodu A přímo do bodu B, je charakterizována pouze pohybem částic v rovině xy. Proto je možné tento příklad řešit pomocí rovinné deformace.

Oba konce modelu jsou vetknuty, všechny prvky mají navíc zamezen pohyb v ose z, tak aby bylo dosaženo rovinné deformace.

Materiálové charakteristiky jsou stejné jako v kapitole 2.3. Jedná se tedy o dural EN AW 2024. Materiálový model byl zvolen LinElast(MAT1). Těleso je typu Shell.

Byly provedeny simulace s vlněním o frekvenci 100 kHz a 300 kHz, každá simulace je pak porovnána s teoretickými výsledky. Vlnění je vybudeno v bodě A pomocí předepsání časově závislé rychlosti. Budící impulzy jsou předepsány tak, aby plynule přecházely do nuly, viz obrázek 3.2. Vycházejí z funkce sinus a obálky vytvořené z Hannovy diskretní funkce. Tyto funkce jsou vytvořeny v Excelu a převedeny do Partranu pomocí formátu CSV.



Obr. 3.2 Budící amplituda o frekvenci 100 kHz

3.3 Určení velikosti prvků

Použitím metody konečných prvků je daný problém diskretizován. Je proto nutné zvolit vhodnou velikost prvků s ohledem na vlnovou délku, tak aby nedošlo u procházející vlny k aliasingu a vzniku chyb. K tomu je vhodné použít alespoň 10 prvků na jednu vlnovou délku. [10]

Nejnižší vlnová délka vlnění je dána nejnižší fázovou rychlostí a nejvyšší použitou frekvencí f_{\max} . Nejmenší rychlost má příčné vlnění, podle vztahu (1.5) pak platí:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{27,44 \cdot 10^9}{2800}} = 3130,7 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{c_T}{f_{\max}} = \frac{3130,7}{5 \cdot 10^5} = 0,00626 \text{ m} \quad (3.1)$$

Aby byla splněna výše uvedená podmínka, musí být velikost prvku menší než jedna desetina λ_{\min} . Pro simulaci byl tedy zvolen prvek o velikosti $L_{\min}=0,5 \text{ mm}$, který splňuje podmínku a umožní umístit v příčném i podélném směru celý počet prvků.

3.4 Určení časového kroku

Zvolení vhodné velikosti časového kroku je další důležitý krok. Příliš velký časový krok by způsobil nižší přesnost výsledků. Obecně platí, že čím menší je krok, tím vyšší je

přesnost. Při volbě příliš malého časového kroku může ovšem dojít k plýtvání výpočetního času bez výraznějších vlivů na výslednou přesnost.

Při volbě časového kroku je nutné splnit dvě podmínky. První podmínka zabraňuje tomu, aby vlna přešla přes celý prvek v průběhu jednoho kroku.

$$\Delta t < \frac{L_{\min}}{c_{L1}} = \frac{0,0005}{6214,9} = 8,45 \cdot 10^{-8} \text{ s} \quad (3.2)$$

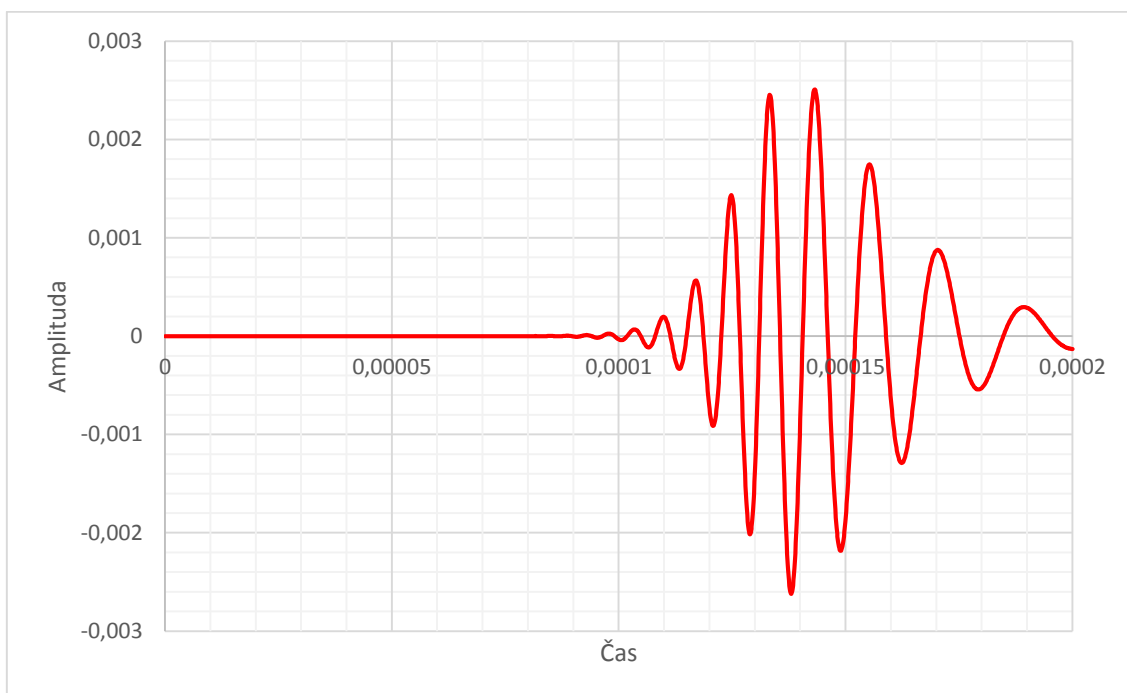
Druhá podmínka zajišťuje, že uběhne alespoň 20 časových kroků, za jeden cyklus vlny s nejvyšší frekvencí. [11]

$$\Delta t < \frac{1}{20 f_{\max}} = \frac{1}{20 \cdot 500000} = 10^{-7} \text{ s} \quad (3.3)$$

Je zřejmé, že první podmínka v sobě zahrnuje také druhou. Časový krok pro výpočet byl zvolen $\Delta t = 5 \cdot 10^{-8} \text{ s}$.

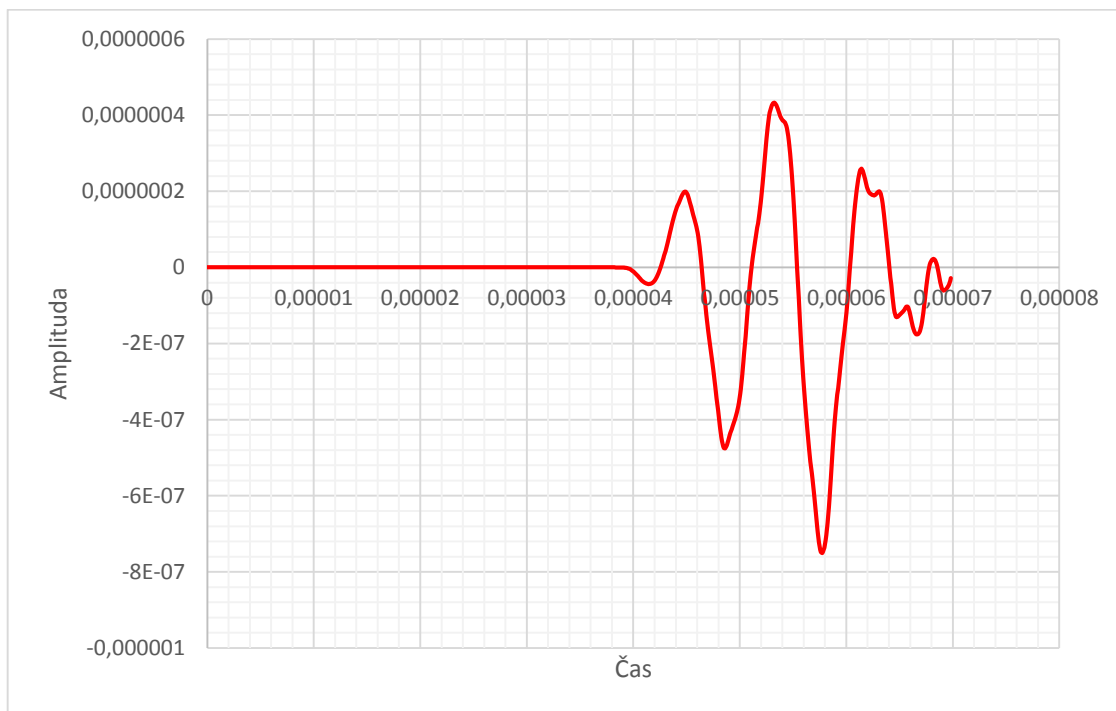
3.5 Výsledky simulací

Každá simulace je srovnána s teoretickými výsledky z programu Waveform Revealer. WFR zobrazuje deformaci pomocí normalizované amplitudy, jde tedy hlavně o srovnání doby šíření vlnění.

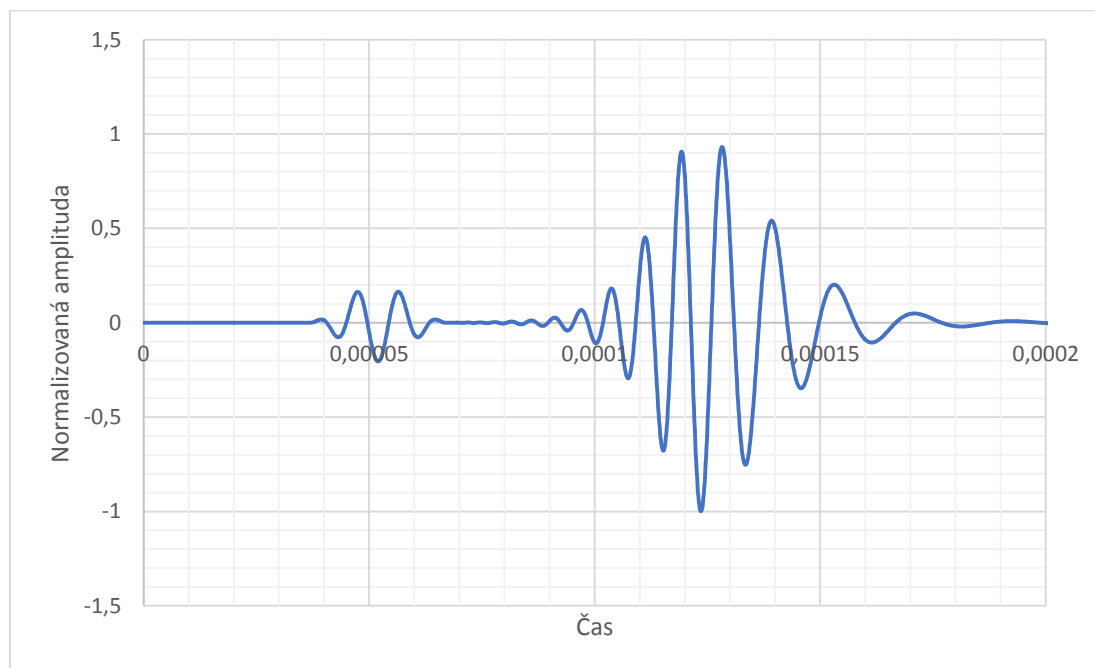


Obr. 3.3 Mód A_0 v bodě B při 100 kHz

Na obrázku 3.3 lze vidět průběh módu A_0 bodem B. Na grafu není vidět mód S_0 , který by měl ovšem dorazit do bodu B dříve než A_0 . Je to dáno tím, že amplituda módu S_0 je velice malá. Na obrázku 3.4 je mód S_0 zobrazen samostatně v jiném měřítku.

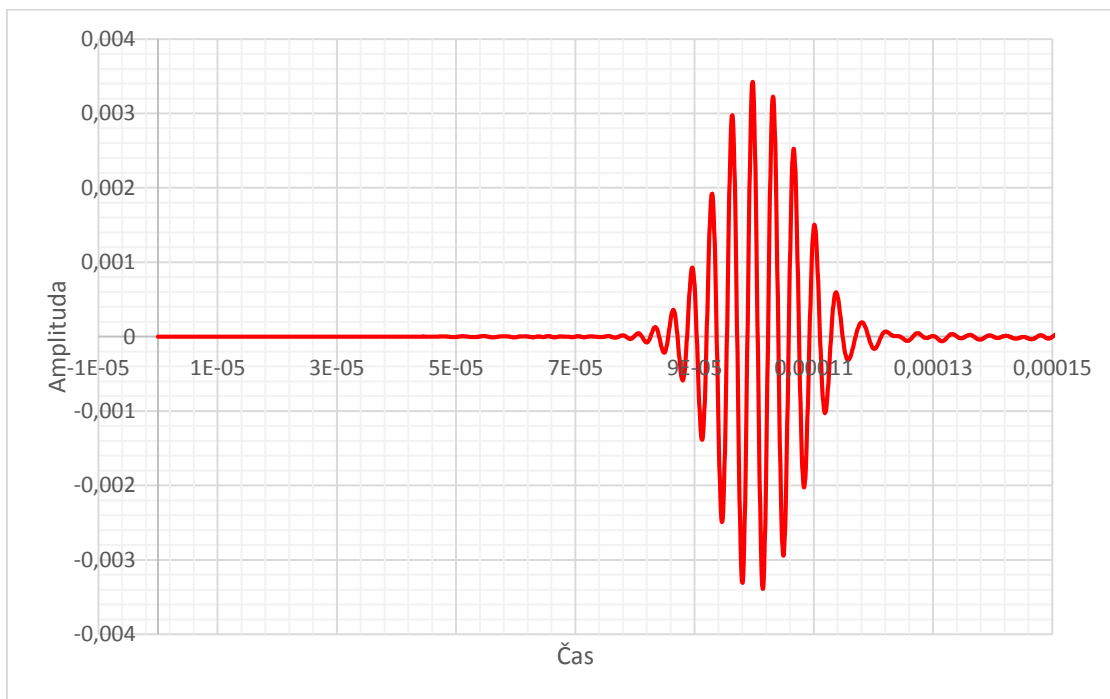


Obr 3.4 Mód S_0 v bodě B při 100 kHz

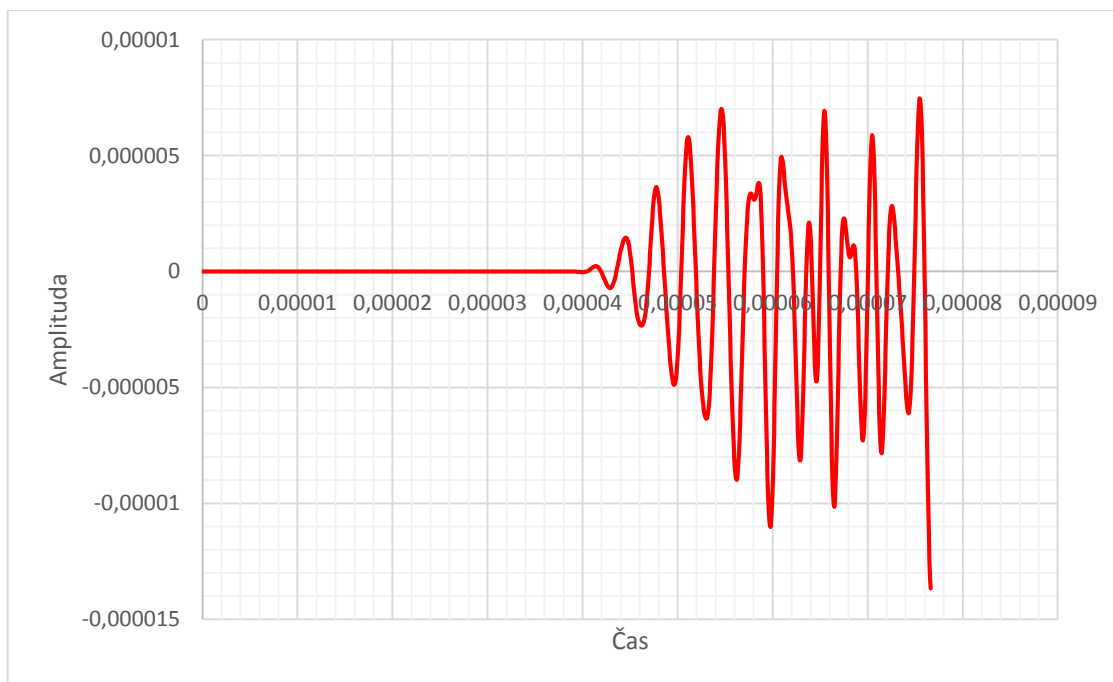


Obr. 3.5 Teoretické řešení pro 100 kHz (vlevo S_0 vpravo A_0)

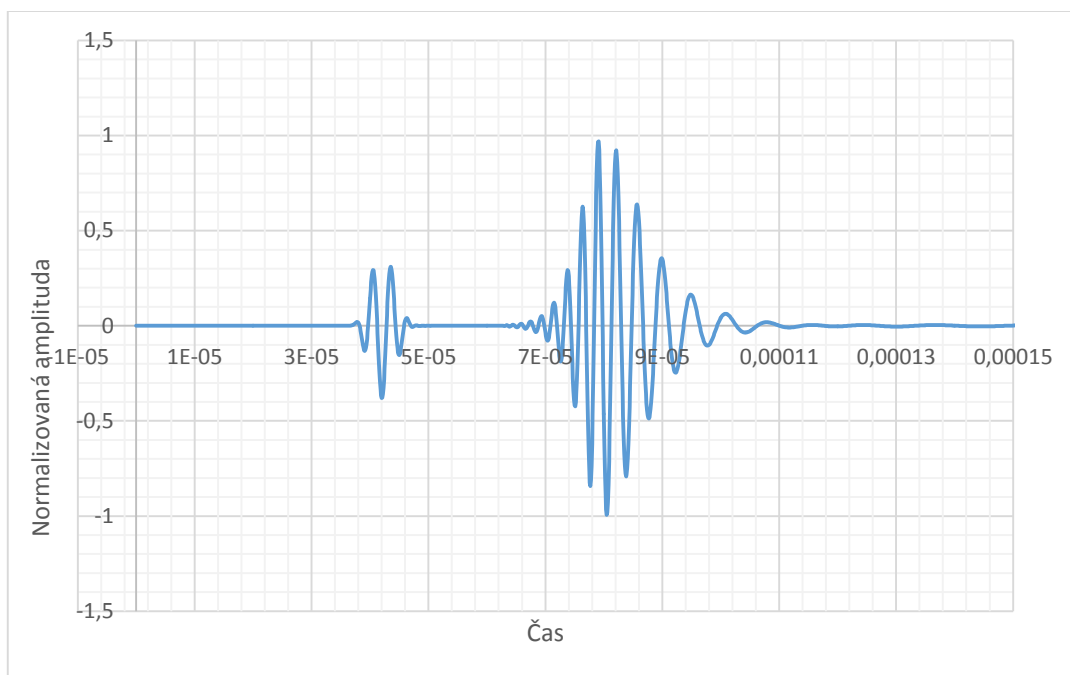
Z uvedených grafů je patrné, že rychlost módu S_0 získaného simulací odpovídá teoretickému řešení, průběh vlny je nicméně mírně zdeformovaný. Mód A_0 získaný pomocí MKP je oproti teoretickému výsledku opožděný.



Obr. 3.6 Múd A_0 v bodě B při 300 kHz



Obr. 3.7 Múd S_0 v bodě B při 300 kHz



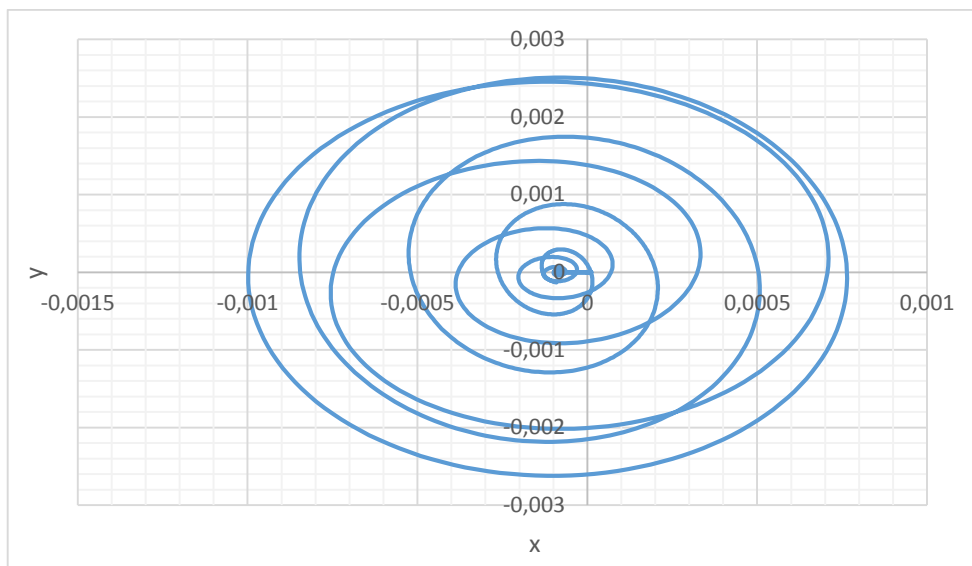
Obr. 3.8 Teoretické řešení pro 300 kHz (vlevo S_0 vpravo A_0)

Při 300 kHz se již za teoretickým řešením mírně opožďuje i simulace módu S_0 . Simulovaný mód A_0 je výrazně pomalejší než je teoretický předpoklad. Je ovšem zřejmé, že se rychlost simulované antisymetrické vlny zvýšila oproti simulaci s nižší vlnovou frekvencí.

Uvedené nepřesnosti mohou být způsobeny tím, že těleso je modelováno pomocí skořepiny. Nepatrné odchylky mohou být způsobeny také tím, že program WFR bere v úvahu rozměr piezoelektrických měničů, které se ve skutečnosti používají na vytvoření a snímání vln.

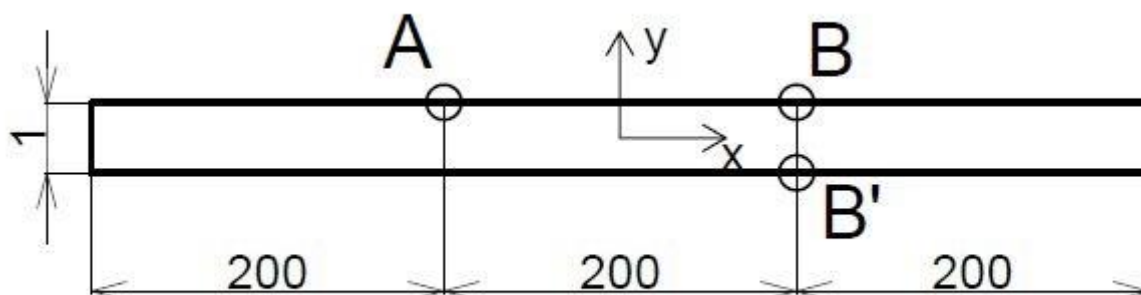
3.6 Trajektorie bodu B

Lambovy vlny jsou charakteristické tím, že kmitající částice se pohybují po trajektoriích eliptického tvaru. Na obrázku 3.9 je trajektorie bodu B při průchodu Lambovy vlny o frekvenci 100 kHz. Trajektorie odpovídá předpokládanému tvaru. Začíná na nule, postupně se po eliptických drahách dostává dále od své rovnovážné polohy a po průchodu vlny se opět vrací k nule. Tento rotační pohyb je dán tím, že Lambovo vlnění je kombinací podélného a příčného vlnění.



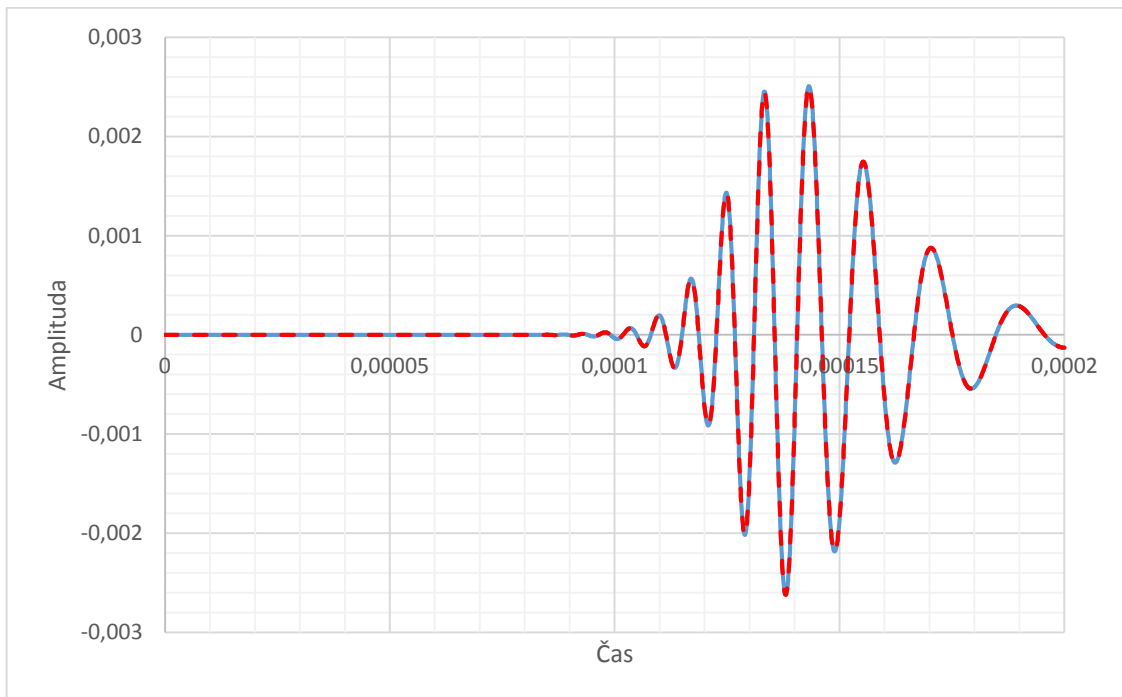
Obr. 3.9 Trajektorie bodu B

3.7 Zobrazení symetrického a antisymetrického módu

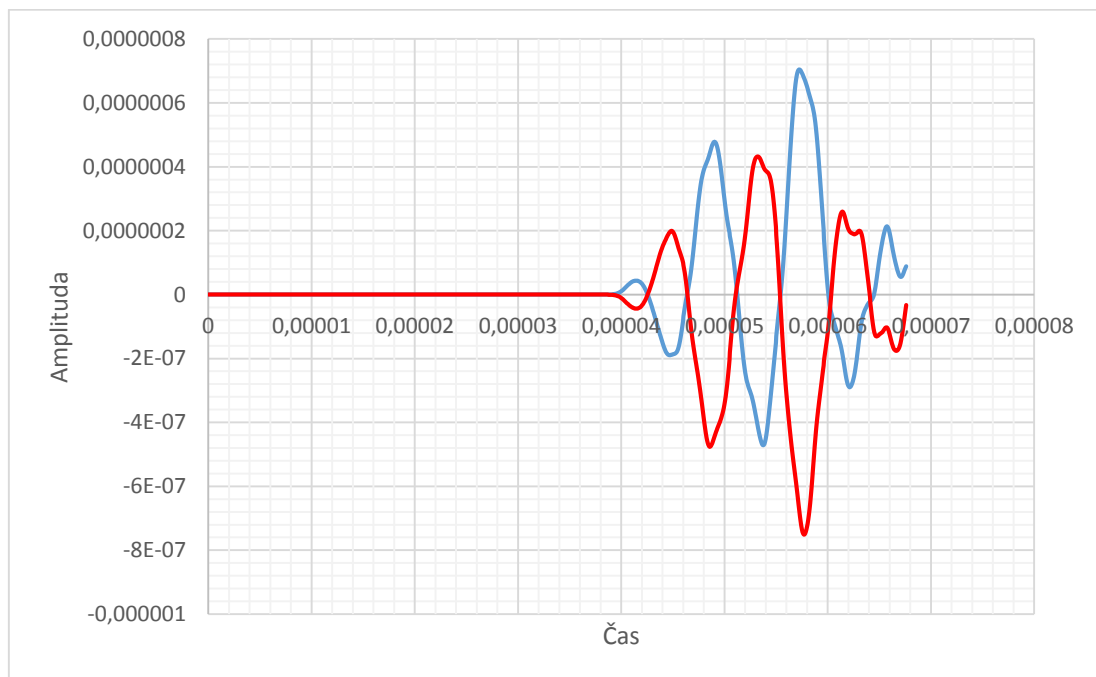


Obr. 3.10 Schéma simulace pro zobrazení A a S módu

Zkoumáním deformace ve směru osy y v bodě B a v bodě B' lze získat představu o tvaru symetrického a antisymetrického módu. Podobně jako v předchozích příkladech je v bodě A vyvolán impulz o frekvenci 100 kHz, po uražení vzdálenosti 200 mm byly sledovány dva body na opačných stranách desky. Do grafů je pak zanesen průběh deformace pro oba body.



Obr. 3.11 Průběh asymetrického módu v bodě B a B'



Obr. 3.12 Průběh symetrického módu v bodě B a B'

Tyto grafy přesně odpovídají předpokládanému tvaru, viz obrázky 2.2 a 2.3. U antisymetrického módu se oba body vychylují v daný okamžik na stejnou stranu, v grafu je to patrné tím, že se oba průběhy překrývají. U symetrického módu se naopak body vychylují na opačné strany tak, že průběhy výchylek jsou souměrné podle osy.

ZÁVĚR

Bakalářská práce je zaměřená na popis Lambových vln v pružném kovovém materiálu a jejich simulaci. Lambovy vlny jsou velice komplikovaný druh mechanického vlnění. Vznikají v tenkých plátech interferencí příčného a podélného vlnění. V materiálu se může šířit velké množství módů tohoto vlnění, proto je vhodné znát způsoby, jak nežádoucí módy eliminovat. K využití Lambových vln je totiž potřeba být schopen jednotlivé módy zachytit a analyzovat. To je pochopitelně komplikované, pokud se v desce pohybuje větší množství módů, které mají navíc třeba podobné rychlosti.

Je třeba podotknout, že Lambovy vlny nejsou omezeny pouze na elastické kovové materiály. Mají také využití při zkoumání kompozitních materiálů nebo viskoelastických materiálů.

K eliminaci nežádoucích módů je výhodné využít zlomových frekvencí, pod kterými některé vyšší módy v desce neexistují. Ke zjištění zlomových frekvencí je možné použít disperzní křivky. Tyto křivky ukazují závislost rychlosti šíření daného módu na jeho frekvenci, případně kombinaci frekvence a tloušťky desky. Disperze také způsobuje vznik fázových a grupových rychlostí. Je pak tedy důležité rozlišovat pohyb fází a pohyb vlnových balíků, které vznikají interakcí jednotlivých fází.

Módy Lambových vln lze rozdělit na dvě charakteristické skupiny: symetrické a antisymetrické. Druh módu výrazně ovlivňuje vzhled pružné deformace, která v materiálu působením vlnění vzniká. Zatímco symetrické módy desku periodicky stlačují a roztahují, antisymetrické módy svým tvarem připomínají ohyb.

K simulaci byl využit program MSC Patran a MSC Dytran. Patran funguje jako preprocesor a zpracovává zadaná data tak, aby je mohl zpracovávat Dytran, který se už stará o samotný výpočet. Dytran po výpočtu také funguje jako postprocesor a umožňuje pracovat s výslednými daty.

Samotná simulace vlnění se provádí jako 2D úloha s využitím rovinné deformace. Částice se totiž pohybují pouze v rovině kolmé na desku a rovnoběžné se směrem postupu vlny. Simulace byly prováděny na jednoduchém modelu tenké duralové desky se dvěma důležitými body, ve kterých se vlnění vyvolávalo, respektive snímalo. Deska byla zobrazena v řezu, její konce byly vetknuté. Konce desky byly v dostatečné vzdálenosti od bodů A a B, aby nedocházelo k rušení odraženými vlnami. Deska samotná měla zamezen pohyb v ose z (kvůli zmíněné rovinné napjatosti). Jako impulzní funkce byla použita sinusoida, která byla pomocí obálky upravena tak, aby plynule přecházela na nulu. V momentě, kdy impuls skončí tak nevznikají žádné skoky v rychlosti nebo v posunutí.

Výsledky simulací jsou poměrně rozporuplné. Vlnění sice vykazují charakteristiky Lambova vlnění, rychlosti ovšem ve většině případu neodpovídají teoretickým předpokladům. Přesto je možné sledovat například zrychlení antisymetrického módu při zvýšené frekvenci. Trajektorie bodu, kterým prochází vlna je také typická pro Lambovo vlnění se svým eliptickým tvarem. Ze simulací jde také vidět zřejmá symetrie a antisymetrie různých módů. Je možné, že použití skořepinového tělesa v Dytranu není vhodnou aproximací případu rovinné napjatosti. Ve výsledcích simulace vznikají poměrně velké nepřesnosti.

V návaznosti na tuto práci by bylo vhodné zpřesnit simulaci Lambových vln pomocí MKP a zaměřit se pak na sledování vlivu vad materiálu na šíření tohoto vlnění.

SEZNAM ZDROJŮ

- [1] ACHENBACH, J. *Wave propagation in elastic solids*. Amsterdam: North-Holland, 1984. ISBN ISBN 07-204-0325-1.
- [2] HAN, SeJin, Anthony N. PALAZOTTO a Charles L. LEAKEAS *Finite-Element Analysis of Lamb Wave Propagation in a Thin Aluminum Plate*. B.m., nedatováno. b.n..
- [3] TIMOSHENKO, S.P. a J.N. GOODIER *Theory of elasticity*. 3. ed., 17. print. Auckland [u.a.]: McGraw-Hill Internat, 1982. ISBN ISBN 978-007-0858-053.
- [4] RAYLEIGH, L. On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid. *Proceedings of the London Mathematical Society* [online]. 1885, roč. s1-17, č. issue 1, s. 147-152 . Dostupné z: doi:10.1016/b978-0-444-41798-5.50018-x
- [5] SU, Z a L YE. *Identification of damage using Lamb waves: from fundamentals to applications*. Berlin: Springer-Verlag, 2009. ISBN ISBN 978-184-8827-844.
- [6] ROSE, Joseph L. *Ultrasonic waves in solid media*. New York: Cambridge University Press, 1999. ISBN ISBN 05-216-4043-1.
- [7] SU, Zhongqing, Lin YE a Ye LU. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2006, roč. vol. 295, č. 3-5, s. 753-780 . Dostupné z: doi:10.1117/12.2042770.3439408395001
- [8] *A Study of Guided Ultrasonic Wave Propagation Characteristics in Thin Aluminium Plate for Damage Detection*. B.m., nedatováno. b.n..
- [9] ALCOM ALVAL ALUMINIUM - EN AW-2024ALCOM ALVAL [online]. 2013 [cit. 28. 05. 2015]. Dostupné z: http://www.hlinik.cz/media/files/product/item/files-12/Hlin%C3%ADkov%C3%A9_plech_y_a_desky_EN_AW-2024.pdf
- [10] ALLEYNE, D., K. R. RAO, D. N. KIM a J. J. HWANG A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 1991, roč. vol. 89, č. issue 3, s. 127-184 . Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4020-6629-0_5
- [11] MOSER, Friedrich, Laurence J. JACOBS a Jianmin QU. Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method. *NDT* [online]. 1999, roč. vol. 32, č. issue 4, s. 225-234 . Dostupné z: doi:10.1016/s0963-8695(98)00045-0
- [12] *LAMSS Products: Software* [online]. [cit. 28. 05. 2015]. Dostupné z: <http://www.me.sc.edu/Research/lamss/html/software.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

λ	[Pa]	Lamého konstanta
λ'	[m]	vlnová délka
μ	[-]	Poissonův poměr
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
ω	[s ⁻¹]	úhlová frekvence
A_i		antisymetrický mód
A		bod na desce
B		bod na desce
B'		bod na desce
c_L	[m.s ⁻¹]	rychlost podélné vlny
c_{L1}	[m.s ⁻¹]	rychlost podélné vlny
c_T	[m.s ⁻¹]	rychlost příčné vlny
c_f	[m.s ⁻¹]	fázová rychlost
c_g	[m.s ⁻¹]	grupová rychlost
d	[m]	tloušťka desky
E	[Pa]	Youngův modul pružnosti
f	[s ⁻¹]	frekvence
G	[Pa]	modul pružnosti ve smyku
h	[m]	polovina tloušťky desky
k	[m ⁻¹]	úhlové vlnové číslo
L_e	[m]	velikost prvku
MKP		metoda konečných prvků
S_i		symetrický mód
SHM		Structural Health Monitoring
Δt	[s]	časový krok
WFR		Waveform Revealer