

Akustické a tepelné vlastnosti sendvičových struktur

Bc. Michal Bartl

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Bartl**

Osobní číslo: **T11024**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Akustické a tepelné vlastnosti sendvičových struktur**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši o problematice kompozitních sendvičových struktur:

- Základní definice, způsoby zatěžování
- Používané materiály
- Základy akustiky
- Základy sdílení tepla
- Způsoby testování sendvičových struktur

2. Experimentální část:

- Popis použitých materiálů
- Příprava zkušebních vzorků
- Testování zvukově izolačních vlastností vzorků
- Testování tepelně izolačních vlastností vzorků
- Vyhodnocení výsledků a závěry

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] Ehrenstein, G. W.: Polymerní kompozitní materiály. Scientia Praha, 2009.

[2] Zenkert, D., Nordic Industrial Fund: The Handbook of Sandwich Construction. Worcestershire; EMAS Publishing, 1997.

[3] Davies, J.M.: Lightweight Sandwich Construction. London; Blackwell Science Publishing, 2001.

[4] Halliday, D.: Fyzika – Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Praha; PROMETHEUS, 2000.

[5] Elektronické zdroje dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ladislav Fojtl

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

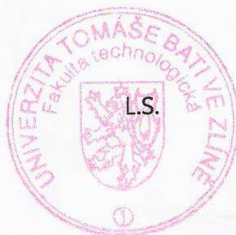
10. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

V této diplomové práci se budeme zabývat zvukovou pohltivostí a tepelnou vodivostí kompozitních sendvičových konstrukcí. Teoretická část práce obsahuje základní informace o kompozitních sendvičových konstrukcích, používaných materiálech a výrobních technologiích dále obsahuje potřebné informace o akustice, jejích základních veličinách a taktéž potřebnou teorii ke sdílení tepla. V praktické části práce je uveden popis jednotlivých materiálů, samotných sendvičových struktur a příprava vzorků pro jednotlivé testy. Konkrétně jsou v této práci měřeny akustické a tepelné vlastnosti sendvičových struktur používaných v dopravním průmyslu.

ABSTRACT

In this Diploma thesis we will deal with an absorption of sound and thermal conductivity of composite sandwich constructions. The theoretical part contains basic information about composite sandwich constructions, used materials and technology of production. Also it contains necessary information about an acoustics and its basic variables. It contains the necessary theory to heat as well. The practical part represents the description of the individual materials, sandwich constructions themselves and preparation of samples for various tests. Specifically, in this study there are measured the acoustic and thermal properties of the sandwich constructions used in the transport industry.

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Ladislavovi Fojtlovi, za odborné vedení, pečlivost a ochotu, s kterou mi pomáhal při práci na této diplomové práci. Dále bych poděkoval Ing. Martinovi Juříčkovi Ph.D., za umožnění měření na zařízení na ústavu fyziky a také konzultace k naměřeným datům. Dále bych poděkoval Ing. Simoně Mrkvičkové Ph.D. za umožnění měření tepelných vlastností a v neposlední řadě firmě Form s.r.o. za umožnění výroby sendvičových panelů potřebných na vzorky.

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| ÚVOD | 10 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 11 |
| 1 STRUKTURNÍ VRSTVENÉ KOMPOZITY | 12 |
| 1.1 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE | 12 |
| 1.1.1 Vlastnosti sendvičových konstrukcí..... | 13 |
| 1.1.2 Výrobní postupy | 14 |
| 1.1.3 Výrobní možnosti..... | 16 |
| 1.2 JÁDROVÉ MATERIÁLY | 16 |
| 1.2.1 Voština | 16 |
| 1.2.2 Polymerní pěny | 17 |
| 1.2.3 Korek..... | 20 |
| 1.2.4 Balza..... | 20 |
| 1.3 KRYCÍ VNĚJŠÍ VRSTVY | 21 |
| 1.3.1 Prepreg | 21 |
| 1.3.2 Další materiály používající se na krycí vnější vrstvy..... | 23 |
| 2 ÚVOD DO AKUSTIKY | 24 |
| 2.1 VZNIK A ŠÍŘENÍ VIBRACÍ A HLUKU..... | 24 |
| 2.2 ZÁKLADNÍ POJMY A VELIČINY V AKUSTICE | 25 |
| 2.2.1 Akustické vlnění v pružném prostředí | 25 |
| 2.2.2 Základní veličiny v akustice..... | 26 |
| 2.2.3 Podmínka vzniku vlnění..... | 28 |
| 2.3 ODRAZ A PRŮCHOD ZVUKU | 29 |
| 2.4 POHLCOVÁNÍ ZVUKU | 31 |
| 2.4.1 Mechanismus pohlcování zvuku | 32 |
| 2.4.2 Činitel zvukové pohltivosti | 33 |
| 2.4.3 Měření činitele zvukové pohltivosti..... | 34 |
| 2.5 MĚŘENÍ HLUKU | 38 |
| 3 ÚVOD DO SDÍLENÍ TEPLA | 41 |
| 3.1 ZÁKLADNÍ POJMY | 41 |
| 3.2 VEDENÍ TEPLA | 41 |
| 3.2.1 Součinitel tepelné vodivosti λ | 43 |
| 3.3 PROUDĚNÍ TEPLA | 44 |
| 3.3.1 Výpočet součinitele přestupu tepla α | 45 |
| 3.4 PROSTUP TEPLA | 46 |
| II PRAKTICKÁ ČÁST | 48 |
| 4 CÍLE PRO PRAKTICKOU ČÁST | 49 |
| 5 POUŽITÉ PŘÍSTROJE | 50 |
| 5.1 KUNDTOVA TRUBICE | 50 |
| 5.2 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ PODLE FITCE..... | 51 |
| 5.3 DALŠÍ POUŽITÉ PŘÍSTROJE | 52 |
| 6 POUŽITÉ MATERIÁLY | 53 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.1 | PRVNÍ SÉRIE VZORKŮ - HLINÍKOVÁ VOŠTINA | 53 |
| 6.2 | DRUHÁ SÉRIE VZORKŮ - POLYPROPYLENOVÁ VOŠTINA | 55 |
| 6.3 | TŘETÍ SÉRIE VZORKŮ - KORKOVÉ JÁDRO | 56 |
| 6.4 | ÚPRAVA VZORKŮ | 59 |
| 7 | VÝSLEDKY MĚŘENÍ | 60 |
| 7.1 | KOEFICIENT ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI | 60 |
| 7.1.1 | Značení daných vzorků a dat | 60 |
| 7.1.2 | Koeficient zvukové pohltivosti sendvičové struktury s hliníkovou voštinou | 61 |
| 7.1.3 | Koeficient zvukové pohltivosti sendvičové struktury s polypropylenovou voštinou | 68 |
| 7.1.4 | Koeficient zvukové pohltivosti sendvičové struktury s korkovým jádrem | 73 |
| 7.1.5 | Koeficient NRC $\bar{\alpha}_n$ | 77 |
| 7.2 | TEPELNÁ VODIVOST Λ | 81 |
| 8 | ZÁVĚR | 84 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 85 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 87 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 88 |
| | SEZNAM TABULEK | 91 |
| | SEZNAM PŘÍLOH NA CD | 92 |

ÚVOD

Sendvičové struktury nacházejí své uplatnění v celé škále technických oborů. V dnešní době se uplatnění kompozitních sendvičových konstrukcí zvyšuje, zvláště u dopravních prostředků, z důvodu nižší hmotnosti za vynikajících mechanických vlastností, konkrétně se jedná o excelentní pevnost a pružnost, odolnost proti nárazu, odolnost proti povětrnosti a izolační vlastnosti. Toho se zvláště využívá v dopravním a leteckém průmyslu, kde je hmotnost jedna z nejdůležitějších veličin materiálů. Každý výrobce dopravních prostředků se snaží snížit hmotnost a tím i zlevnit provoz. Tímto snížením dojde taktéž ke snížení emisí nebezpečných plynů a látek do ovzduší. Ve stavebnictví se tyto konstrukce používají na izolace budov, tuto schopnost zajišťuje jádro sendvičové konstrukce. Dalším uplatněním je pro tyto konstrukce odvětví sportu, ve kterém mají tyto konstrukce uplatnění především při výrobě sportovního náčiní jako jsou například lyže nebo surfy. Nevýhodou těchto sendvičových kompozitních konstrukcí může být u některých aplikací vysoká cena, kterou lze však redukovat vhodně zvolenými materiály.

Kompozitní sendvičové konstrukce se skládají ze dvou vnějších tuhých vrstev, které přenáší tlakové a tahové namáhání a jádra z materiálů, které má nízkou hustotu a zajišťuje přenos smykového namáhání mezi vnějšími vrstvami. Sendvičové konstrukce mají všeobecně mnoho velmi dobrých vlastností. Tyto vlastnosti se mění s použitými materiály, kterých je velká škála a díky nim se také tyto konstrukce mohou používat v mnoha odvětvích s mnoha různými požadavky na vlastnosti materiálu.

Jedny z důležitých vlastností sendvičových konstrukcí používaných u kolejových vozidel na které se tato práce zaměřuje jsou tepelná vodivost a akustická absorpce (pohltivost). Zvláště pak u osobních kolejových vozidel, kde je potřeba zamezit vniknutí hluku a extrémních teplot do prostoru cestujících.

I. TEORETICKÁ ČÁST

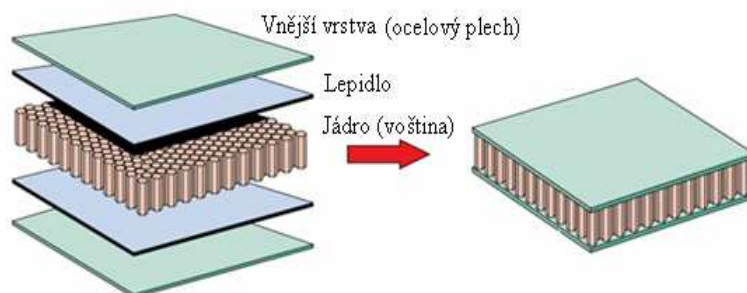
1 STRUKTURNÍ VRSTVENÉ KOMPOZITY

Strukturní kompozity jsou vytvořené z vrstev různých materiálů, které poskytují rozdílné potřebné vlastnosti jako například pevnost, tvrdost, korozní odolnost a další. Mohou to být například i desky zpevněné vlákny. Do této kategorie spadají tenké povlaky, bimetaly, ale především lamináty a mikrolamináty (například kompozity, v kterých se střídají vrstvy hliníku a polymeru zpevněného vlákny). Mezi nejznámější mikrolamináty s širokým uplatněním především v letectví patří Arall (arami - Al), a Glare (sklohliníkový laminát). [3, 24]

1.1 Sendvičové konstrukce

Sendvičové konstrukce (Obr. 1) řadíme k vrstveným konstrukcím, které jsou tvořené různými jednoduchými či složenými materiály odlišného charakteru spojených do jednoho celku pevnou vazbou. Spojují vlastnosti tuhých a pevných vnějších krycích vrstev materiálů a jádra přenášejícího při namáhání zejména smykové napětí. Velmi důležitá je vazba mezi vnější krycí vrstvou a jádrem. Jedny z nejpoužívanějších a nejdůležitějších jader jsou tvořeny buď z profilových vrstev (voštin) anebo pěn. Nejčastějším typem materiálů pro jádra jsou dřevo, plasty nebo kovy. [3]

Jednou ze skupin jsou Prepreg sendvičové konstrukce, které jsou z tenkých nosných vrstev z prepreg materiálů, spojených s voštinovým pěnovým nebo balzovým jádrem. Průsycený prepreg nevyžaduje dodatečnou lepicí vrstvu a umožňuje výrobu lehké konstrukce při snížení nákladů na výrobu. Výhody voštinového jádra s krycí nosnou vrstvou prepregu jsou především velmi nízká hmotnost, vysoká tuhost, trvanlivost, volnost při návrhu, snížení nákladů na výrobu. Sendvičové panely mají hlavní přínos po mechanické, akustické a termomechanické stránce. [3, 26]



Obr. 1 Skladba vzorového sendvičového panelu [3]

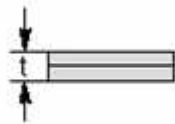
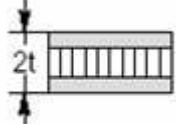
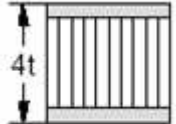
1.1.1 Vlastnosti sendvičových konstrukcí

Sendvičové konstrukce se uplatňují především v letecké dopravní technice, kde se využívají jejich hlavní přednosti, jakými jsou značná ohybová pevnost a tuhost, při nízkých hmotnostech. Používají se však i v ostatních průmyslových odvětvích (stavebnictví, železniční doprava). Mezi další výhody patří především jejich únavová odolnost, odolnost proti šíření trhlin, odolnost proti rázům, tepelná odolnost a odolnost proti ohni, tlumení a tepelná a akustická izolace. Tyto vlastnosti jsou určeny především materiálem jádra. [3]

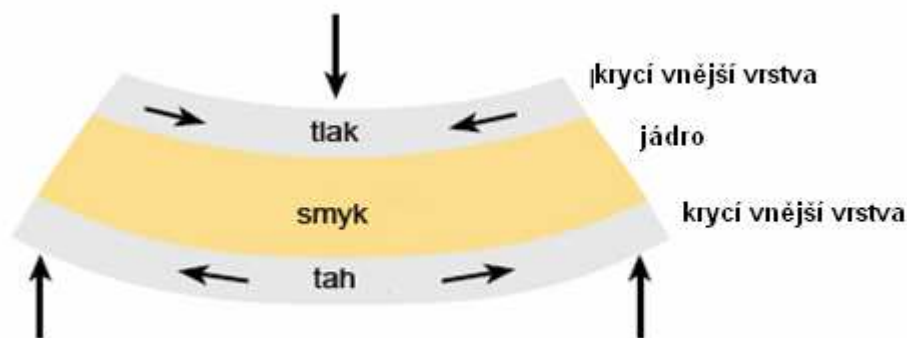
- Tuhost a pevnost v ohybu

Ohybová tuhost sendviče je přímo úměrná druhé mocnině jeho tloušťky (Tab.1). Se zvětšováním tloušťky sendviče dochází k velmi malému nárůstu hmotnosti. Narůstá pouze tloušťka jádra, které obvykle mívá nízkou hustotu. Pevnost v ohybu taktéž roste se vzdáleností vnější vrstvy od nulové osy, ale při dimenzování sendviče je nutné zároveň posuzovat smykovou pevnost jádra. Pevnost jádra ve smyku roste s jeho hustotou. [3, 25]

Tab. 1 Změna tuhosti v závislosti na tloušťce jádra

| | Celistvý materiál | Síla jádra t | Síla jádra $3t$ |
|-----------------|---|--|---|
| |  |  |  |
| Tuhost | 1 | 7 | 37 |
| Pevnost v ohybu | 1 | 3,5 | 9,2 |
| Hmotnost | 1 | 1,03 | 1,06 |

O pevnosti sendviče v tlaku ve směru jeho tloušťky rozhoduje především pevnost jádra v tlaku, ale i tuhost a tloušťka vnější vrstvy. Pevnost jádra v tlaku roste s jeho hustotou. Voštinové jádra mají lepší mechanické vlastnosti než pěnové jádra při stejné hustotě. Při volbě jádra je nutné zohlednit všechny faktory. Důležité je také rozložení namáhání kolmé na tloušťku sendvičového materiálu (Obr. 2), z důvodu možné delaminace. Tyto namáhání by se měly zohledňovat při navrhování konstrukce ze sendvičových materiálů. [3, 25]



Obr. 2 Rozložení namáhání při ohybu

- Tepelná odolnost a odolnost proti ohni

U tepelné odolnosti se musí brát v úvahu všechny složky, jak vnější vrstvy, tak jádra i spojovacího lepidla. U tohoto parametru hraje velkou roli tepelná vodivost použitých materiálů. Při vysoké tepelné vodivosti použitých materiálů je ohřev sendviče nižší jak při nízké tepelné vodivosti (při ohřevu sendviče pouze na jedné straně). Tyto vlastnosti se využívají při stavbě kosmických raket, kde se právě z tohoto důvodu používají hliníkové voštiny. Při návrhu sendviče pro dopravní techniku je nevyhnutelné respektovat požadavky konstrukčních předpisů na odolnost proti ohni. Všechny materiály musí mít atest, že splňují příslušné předpisy na odolnost proti ohni. [3]

1.1.2 Výrobní postupy

Ruční laminování se využívá na výrobu obkladů karosérií dopravních prostředků (autobusů, tramvají, vlaků), při výrobě lodí, krytování přístrojů a zařízení a v neposlední řadě na dizajnové prvky v různých odvětvích nejenom průmyslu. Při ručním laminování se používají tyto druhy pryskyřic: polyesterová, epoxidová, vinylesterová, fenolická. Jako výztuže se používají: sklo, uhlík, kevlar, čadič a jako přírodní vlákna se používají: juta a konopné vlákna. [3, 26]

Výhody ručního laminování jsou jednoduchá a rozšířená technologie, ekonomická varianta výroby (nízké náklady na výrobu formy), tato metoda je vhodná pro malé série výrobků a také vhodná pro velkorozměrové výrobky a složité tvary výrobku. Nevýhody ručního laminování jsou kvalita výroby závisí na zručnosti pracovníků a pracovníci jsou vystavení výparům styrenu [3, 26]

RTM metoda se používá pro výrobu odkladů karosérií dopravních prostředků (autobusů, tramvají, vlaků), při výrobě lodí, krytování přístrojů a zařízení a v neposlední řadě na dizajnové prvky v různých odvětvích nejenom průmyslu. Jako výztuže se používají ve většině případů sklo a v leteckém průmyslu uhlík. Výhody RTM jsou jednoduchá a rozšířená technologie, produktivnější a přesnější technologie v porovnání s ručním laminováním, vhodná pro střední série 300 až 5000 kusů a oproti ručnímu laminování mají obě strany hladký povrch. Nevýhody RTM jsou vyšší náklady na výrobu forem oproti ručnímu laminování, formy jsou převážně robustní a těžké (je nutný jeřáb) a není možné vyrobit výrobky s negativním úhlem. [3, 26]

Vakuová infúze - Suché výztuže ve formě tkanin nebo speciálně tkaných rohoží se postupně kladou do dutiny formy, na naskládané výztuže se kladou další technologicky potřebné materiály. Jako například separační fólie, rozváděcí tkanina a vakuování fólie. Pomocí vakuovací fólie se všechny materiály ve formě slisují, následně je do dutiny formy transportována pryskyřice pomocí vakua a rozváděcí tkaniny. Při tomto procesu se suché výztuže smáčí pryskyřicí. Následně se pryskyřice vytvrzuje za normálních atmosférických podmínek. [3, 26]

Tato metoda se používá pro výrobu lodí a vrtulí větrných elektráren. Výhody vakuové infúze jsou kontrolovaný proces zaručuje lepší kvalitativní a mechanické vlastnosti produktu, vhodná pro menší série a vhodná pro velkorozměrové výrobky. Nevýhody vakuové infúze jsou technologicky složitý proces a zvýšené náklady na pomocný technologický materiál (rozváděcí tkanina, separační a vakuová fólie) [3, 26]

Vakuové lisování prepregů využívá již pryskyřicí předimpregnované materiály (tzv. prepregy). Ty se podle přesného plánu kladou do dutiny formy ve více vrstvách. Na naskládané prepregy ve formě se kladou další technologicky potřebné materiály (odtrhová tkanina, separační fólie, odsávací rohož a vakuování fólie). Pomocí vakuovací fólie a aplikaci vakua se všechny materiály ve formě slisují. Celá forma se vloží do vyhřívací pece z důvodu toho, že prepregy se vytvrzují při zvýšených teplotách (tyto teploty se liší podle druhu prepregu) popřípadě za zvýšeného tlaku (5 atm.) Tato metoda se používá v leteckém průmyslu. Při vakuovém lisování prepregů se používají tyto druhy pryskyřic: fenolická, epoxidová, pro vysokoteplotní aplikace se používají polyamidové a kyanátesterové. Jako výztuže v prepregích se používají ve formě tkanin, často jsou tkaniny i jednosměrné. Možné využití sendvičových materiálů hlavně voštin ale i různých druhů pěn (PVC, PET, PIM) při výrobě sendvičových konstrukcí. [3, 26]

Výhody vakuového lisování prerpegů jsou kontrolovaný proces zaručuje lepší kvalitativní a mechanické vlastnosti produktů a vhodná technologie pro velkorozměrové výrobky. Nevýhody vakuového lisování prerpegů jsou technologicky složitý proces, zvýšené náklady na pomocný materiál. [3, 26]

Pultrúze - výztuž ve formě systému nekonečného vlákna je tahaná přes pryskyřičnou koupel a následně přes vyhřívanou formu. Po dobu tahání impregnovaného vlákna přes formu se pryskyřice vytvrzuje a vytváří se tak požadovaný profil, následně se pak profily řežou na požadovanou délku. Tato metoda se využívá na výrobu různých profilů do různých odvětví průmyslu. Výhoda pultruze je produktivní technologie výroby (podle složitosti profilu 1 až 5 metrů za minutu). Nevýhody pultruze jsou náročný rozběh technologického cyklu a tvarové omezení profilů. [3, 26]

1.1.3 Výrobní možnosti

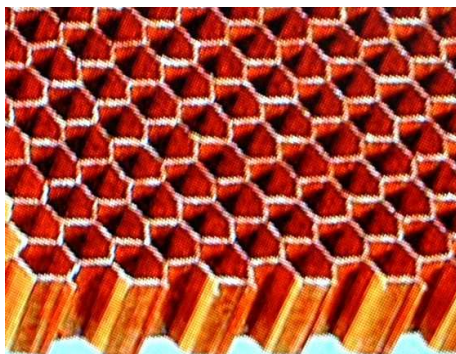
Sendvičové konstrukce nejsou pouze ve formě rovných desek, ale mohou tvořit i složité tvary s výstupky a prolisy. Pro složité tvary sendvičových konstrukcí je použití kovových potahů velmi nákladné, z tohoto důvodu se používají zejména vnější vrstvy z kompozitních materiálů. Požadovaný tvar sendviče ovlivňuje volbu vhodného jádra; například pro zakřivené tvary sendvičů je obtížné použít voštinu s hexagonální buňkou, v tomto případě se používá voština se speciálním tvarem buňky (obdélníkovým) nebo tepelně tvarovaná pěna. [3, 25]

Tvarové dílce se používají například jako materiál pro dopravní prostředky a pohyblivé části konstrukcí a strojů nebo čela kolejových jednotek anebo na lodě a čluny. Jak bylo zmíněno výše tepelné a akustické vlastnosti sendvičových struktur jsou dány zejména materiálem jádra, v následující části jsou popsány nejpoužívanější jádrové materiály. [3]

1.2 Jádrové materiály

1.2.1 Voština

Voština je materiál, který se používá jako jádro s různou výškou, velikostí a tvarem buněk v sendvičových kompozitech. Koncept vynalezl Norman de Buone a nechal ho patentovat v roce 1938 jako hliníkovou voštinu pro sendvičové kompozity. Průmyslově se vyrábí od roku 1945. Označení voština je odvozené od podobnosti s šestihrannou strukturou plástve včelího medu.



Obr. 3 Struktura voštiny

Voštiny se formují z plošného materiálu několika různými způsoby. Jeden z moderních výrobních postupů zůstává stříhání fólie a spojování dvou listů vzniká panel s šestihrannými dutinami v příčném směru nanášení pryskyřice a sušení – řezáním panelu v rozdílném směru se tvoří voštinové pláty s určitou tloušťkou. [3]

Jako základní materiál se používají skelné pláty s určitou tloušťkou. Jako východní materiál se používají skleněná vlákna aramidové nebo uhlíkové fólie, nebo textilie a někdy hliníkový plech. [3]



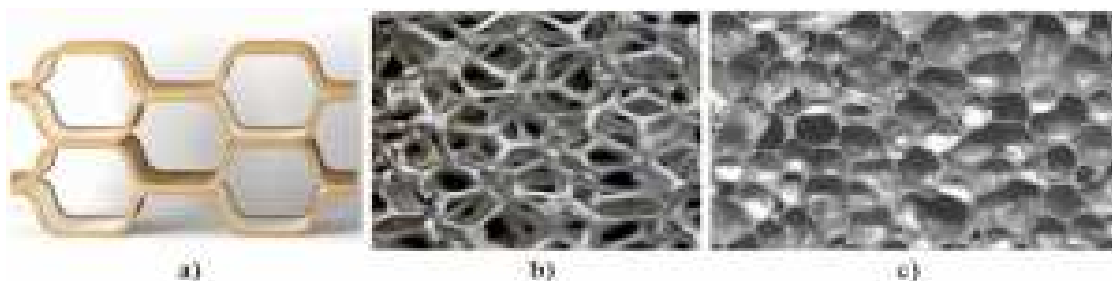
Obr. 4 Hhliníková voština

Stěny voštin mají vzhled papíru, buňky mají velikost od 3,2 do 9,6 mm. A hustotu $32 - 96 \text{ kg/m}^3$ a tlakovou pevnost 1- 7 MPa. Základní tvar voštin je šestiúhelníkový ale známe i skládané nebo pyramidové. Při výrobě sendvičů se voštinový plát před přiložením překryje lepicí fólií, která se potom při vyšší teplotě roztaví a spojí voštinu s potahem. [3, 24]

1.2.2 Polymerní pěny

Pěny jsou dvoufázové systémy se spojitou termoplastickou a nebo reaktoplastickou maticí, v které je v značném objemovém podílu od 50 do 90% dispergovaná polymerní

fáze. Polymerní pěny se vytváří vakuovou expanzí a nebo vytlačováním taveniny polymeru do vakuové komory, ale také jednoduchým mícháním či tlakovým foukáním plynu do taveniny polymeru. Struktura polymerních pěn je tvořena buď uzavřenými, nebo otevřenými buňkami. [3, 24]



Obr. 5 Struktury polymerních pěn

(a) voština, b) pěna s otevřenými buňkami, c) pěna s uzavřenými buňkami) [3]

Vlastnosti buňkových pěnových těles jsou výsledkem kombinace vlastností buňkové struktury a vlastností materiálu použitého na jeho výrobu. Tyto dva faktory spolu s relativní hustotou buňkových těles jsou určujícími parametry pro jejich fyzikální a mechanické vlastnosti. [3]

Příčně síťované PVC - příčným zesíťováním molekulových řetězců se zvyšuje pevnost a tuhost na úkor prodloužení

- zvyšuje se i tepelná odolnost, což umožňuje kombinaci s prepregy jako potahem [3]

Lineárně síťované PVC - velmi dobrá odolnost vůči nárazu

- prodloužení až o 70%
- teplotně méně odolné a méně odolné vůči styrenu [3]

PUR - náhrada překližky

- o málo dražší pěna, ale mnohem lehčí
- je však křehká a nevhodná pro pevnostní aplikace [3]

SAN – styrenakrylonitril

- nevhodné FST (fire smoke toxicity) vlastnosti
- existuje několik základních typů:

Typ A – lineárně síťovaný, dobré prodloužení (50 - 60) % lepší tepelné vlastnosti jako lineární PVC, ale stále nepoužitelný v kombinaci s prepregy

Typ P – lepší tepelná stabilita, ale na úkor pevnosti ve střihu

Typ T - ještě lepší tepelná stabilita, ale na úkor pevnosti ve střihu

Typ M – nový typ, dobré prodloužení i pevnost na úkor hmotnosti [3]

PET – termoplast/recyklovatelný

- tvarovatelný za tepla

- AIREX T90 – výborné FST vlastnosti

- AIREX T92 – výborné mechanické vlastnosti

- výborná tepelná odolnost zpracovatelnost i s prepregy

- vyšší hustota – 100kg/m^3 [3]

- **Fyzikální vlastnosti**

Nízká hustota, tím pádem i hmotnost buňkových těles je dána buňkovou strukturou, obsahem dutin v buňkách je obvykle plyn. Důležitým parametrem při porovnávání buňkových těles je jejich tzv. relativní hustota:

$$\rho_{rel} = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (1)$$

Relativní hustota představuje podíl hustoty pevného materiálu ρ^* a hustoty materiálu ρ_s , z kterého je pěna vyrobená. Míru volného místa vyplněného plynem nebo kapalinou charakterizuje pórovitost:

$$\phi = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (2)$$

Buňkové materiály mají relativní hustotu menší než 0,3, ultralehké pěny dokonce až 0,003. Hustota je určujícím faktorem, který ovlivňuje ostatní jak fyzikální tak mechanické vlastnosti buňkových těles, proto se její změna využívá na dosažení požadovaných hodnot vlastností žádaných pro danou aplikaci použití pěn. [25]

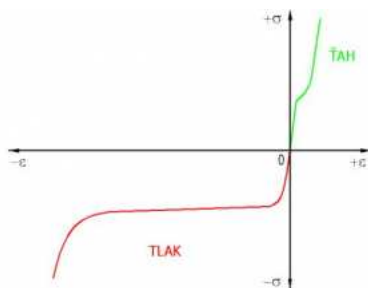
Vodivost (elektrická a tepelná) – vodivost buňkových těles, je nižší než u plných materiálů. Důvodem je nízký podíl materiálu stěn a hran v objemu buněk a vysoký poměr plynových dutin v objemu buňkového tělesa. Tím je zřejmé, že se zvyšující se hustotou buňkových

těles narůstá vodivost. U kovových pěn je jejich tepelná vodivost zhruba 1/10 vodivosti kovu, z kterého je vyrobená. Tato tepelná vodivost se dá ještě snížit dalším oxidačním zpracováním. Koeficient tepelné roztažnosti u kovových pěn je stejný jako u plných materiálů. [25]

Zvukově a vibračně izolační vlastnosti – zvukové vlny se v pěnách odráží od jejich nepravidelné struktury. Vibrační energie způsobuje deformaci stěn buněk a mění se na tepelnou energii. Proto intenzita odraženého zvuku klesá. Absorpční stupeň pohlcení je možné zvýšit jemným a homogenním rozložením buněk v objemu materiálu. [25]

- **Mechanické vlastnosti**

Podle pracovních diagramů je chování pěn v tahu a tlaku rozdílné (Obr. 6). V tlaku je výrazná tzv. plato oblast, kde deformace rychle vzrůstají při minimální změně napětí, tím se zvyšuje jejich schopnost pohlcovat energii, která se využívá při aplikaci pěn jako balící, absorpční, a ochranný materiál. V tahu je tato oblast velmi málo výrazná. [3, 25]



Obr. 6 Tahový a tlakový diagram

1.2.3 Korek

Korek je přírodní produkt, který se skládá ze suberinu (hlavní komponent buněčných stěn působící pružnost korku), ligninu (pojící sloučenina), polysacharidů (komponent určující texturu korku), taninu (polyfenylenová sloučenina určující barvu), ceroidu (hydrofobní sloučenina zajišťující nepropustnost korku), minerální vody a ostatních prvků, které mají v korku jen velmi malé zastoupení. Korkové pletivo obsahuje 89.7 % plynů, to zapříčiňuje, že je jeho hustota velmi malá. Korek nepodléhá hnilobě a je velmi dobrý izolant, jak tepelný tak akustický. [23]

1.2.4 Balza

Jejich první použití se datuje do padesátých let 20. století, kde se používaly na trupy hydroplánů. Tento materiál se nedeformuje, když je vystaven zvýšeným teplotám.

Za nevýhody balzy se považuje poměrně vysoká hustota, která se pohybuje kolem 100 kg/m^3 , absorpce vody a vysoká nasákavost pryskyřicí. Vlákná balzy se lepí do bloků, bloky se řežou kolmo na vlákna, tím se výrazně zvyšuje pevnost ve stříhu a v tlaku. [23]

1.3 Krycí vnější vrstvy

Na vnější vrstvy sendviče se nejčastěji používají lamináty vyztužené skelnými nebo uhlíkovými vlákny a pro některé účely i kovové fólie. Jádro a potahy pro optimální splnění funkce sendviče musí být dokonale spojené, přičemž se využívá na spojení matrice potahu nebo speciální lepidla. Vzniká tak velmi tuhá konstrukce odolávající dynamickému namáhání a rázům. [23]

1.3.1 Prepreg

Pro výrobu dílů lisováním nebo v autoklávu se nejčastěji používá předimpregnovaná výztuž, tzv. prepreg. Prepregy s reaktivním reaktoplastickým pojivem se musí skladovat při teplotách přibližně -20°C a maximálně po dobu 6 měsíců, tuto dobu však ovlivňuje reaktivita použitého pojiva. Přibližně 6 hodin před zpracováním se prepreg rozmrazí, nejlépe za nepřítomnosti vzduchu aby nedošlo ke srážení vzdušné vlhkosti. Za normální teploty má prepreg lehce lepivý povrch, tato lepivost se může lehce zvýšit pozvolným zahřátím na teplotu maximálně 50°C . [9]

Výhody prepregů:

- vysoký podíl vláknové výztuže
- minimální podíl dutin v kompozitu
- Přesné množství pryskyřice
- rovnoměrná kvalita...

Nevýhody prepregů:

- vyšší cena (časově i energeticky náročnější technologie)
- poměrně velký odpad
- nutnost skladování při nízkých teplotách...

Druhy prepregů:

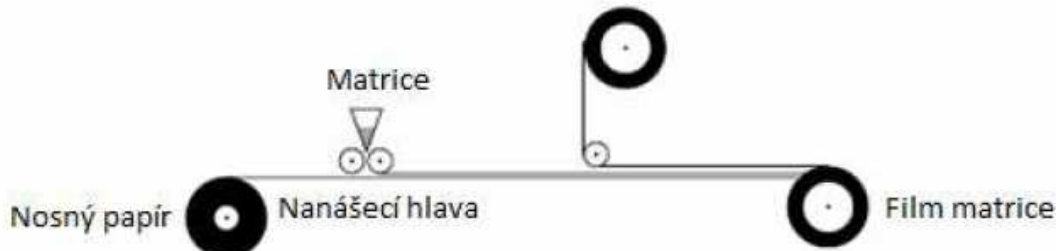
Jednosměrný prepreg vyrobený z rovingů (výztuž ve tvaru nekonečných vláken bez krutu), který je určen pro mechanicky namáhané díly. Dodává se v kotoučích různé šířky a má malou tloušťku. [9]

Vícevrstvý prepreg, je více jednosměrných prepregů pootočených o určitý úhel, spojených prošitím polyesterovou nití. [9]

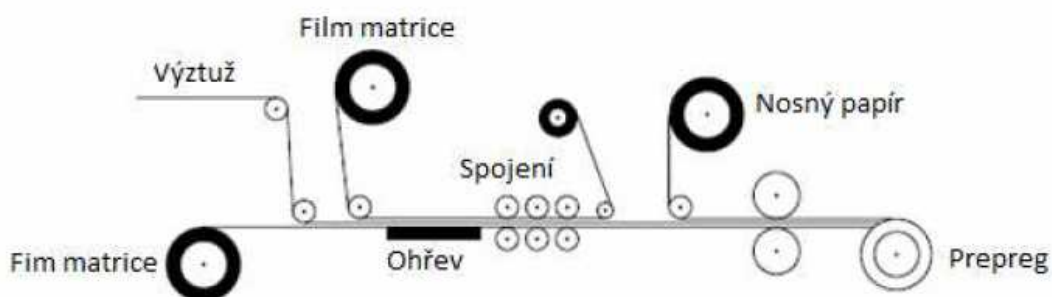
Kombinované prepregy, vrstvy s rohožemi se kladou na stranu vystavenou koroznímu prostředí a vrstvy s tkaninovou výztuží se dávají na mechanicky více namáhanou stranu výrobků. [9]

- Technologie výroby prepregů

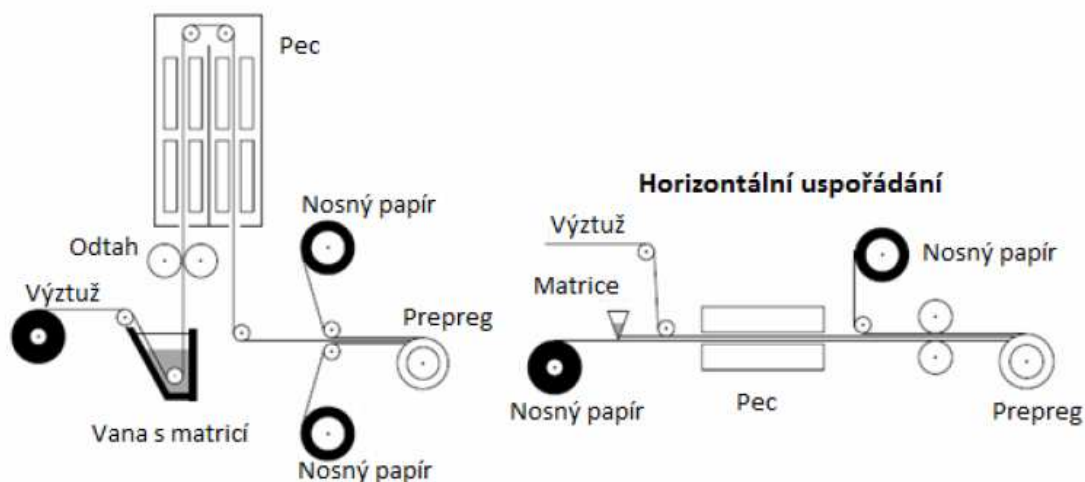
Sériová výroba konstrukčních prvků například v dopravním průmyslu, se částečně automatizuje – pás prepregu je ukládán pomocí číslicově řízených strojů, takže je výroba reprodukovatelná. Dvoukroková výroba prepregů je zobrazena Obr. 7 a 8. a jednokroková na Obr. 9.



Obr. 7 Výroba filmu matrice [9]



Obr. 8 Vzájemná konsolidace filmu matrice a vlákna [9]



Obr. 9 Jednokrokové horizontální a vertikální uspořádání výroby prepregů [9]

Tkaniny v prepreg materiálech jsou děleny podle hmotnosti 1 m^2 . Vlákna v tkaninách mohou být uspořádány buď různými směry nebo jednosměrně. Plátňová vazba je nejpevnější, ale také nejméně poddajná. Krepová vazba je ohebnější avšak pouze při měkké povrchové úpravě. Další druhy vazeb jsou, atlasová, košíková a hybridní tkaniny atd. [23]

1.3.2 Další materiály používající se na krycí vnější vrstvy

Mezi další materiály používané u sendvičových struktur pro krycí vnější vrstvy patří hliník a ocel v podobě plechů, a ve stavebnictví to jsou dřevotříska a překližka. [23] Těmito materiály se však práce dále nezabývá, neboť při výrobě vzorků je použito pouze prepreg vnějších vrstev.

2 ÚVOD DO AKUSTIKY

2.1 Vznik a šíření vibrací a hluku

Vibrace a hluk jsou průvodními jevy pracovních procesů všech strojních zařízení – výrobních strojů, dopravních prostředků, různých domácích spotřebičů a podobně. Nelze proto vibrace a hluk zcela z pracovního a životního prostředí odstranit, lze je pouze redukovat na přijatelnou hodnotu. [5]

Vibrace pružných médií (pevných látek, tekutin) vznikají v důsledku časově proměnných silových účinků, působících v některých místech sledovaného média. Vibrace se pak šíří od zdroje do ostatních částí prostředí. [1]

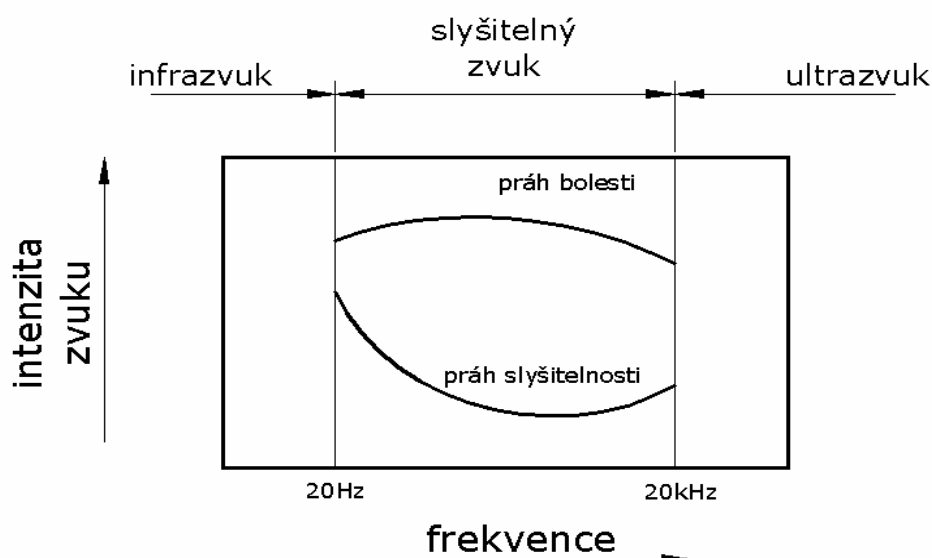
Hlukem je nazýváme jakýkoli nežádoucí, obtěžující a rušivý zvuk. Je obtížné jinak definovat hluk, neboť velmi záleží na vztahu člověka k danému zvuku. Zvuk je tedy obecnějším pojmem, než je hluk. [5]

Základní příčinou zvuku je pohyb částic příslušného pružného prostředí v jeho některé oblasti. Zdrojem zvuku je tedy vymezená část prostředí, kde vzniká akustická energie a od které se tato energie šíří do okolního prostředí. [2]

Příčiny vzniku akustické energie (zvuku, hluku) jsou:

- Mechanické kmity povrchů strojů, stěn budov, technologických zařízení, respektive jejich částí – mechanický hluk,
- Nestacionárního proudění plynného nebo kapalného proudění - aerodynamický hluk.

Člověk se necítí dobře v prostředí s neobvykle nízkou hladinou hluku. Hodnoty blízké 20dB (většina lidí považuje hluboké ticho a za nepříjemný stav). Při hladině hluku nad 130dB se účinky hluku zpravidla mění na bolest sluchového orgánu (práh bolesti). Práh bolesti se také mění s frekvencí jak je zobrazeno na Obr. 10. Při hladinách hluku nad 160dB dochází již k poruše bubínku sluchového orgánu. [5]



Obr. 10 Prahové křivky slyšitelnosti

2.2 Základní pojmy a veličiny v akustice

2.2.1 Akustické vlnění v pružném prostředí

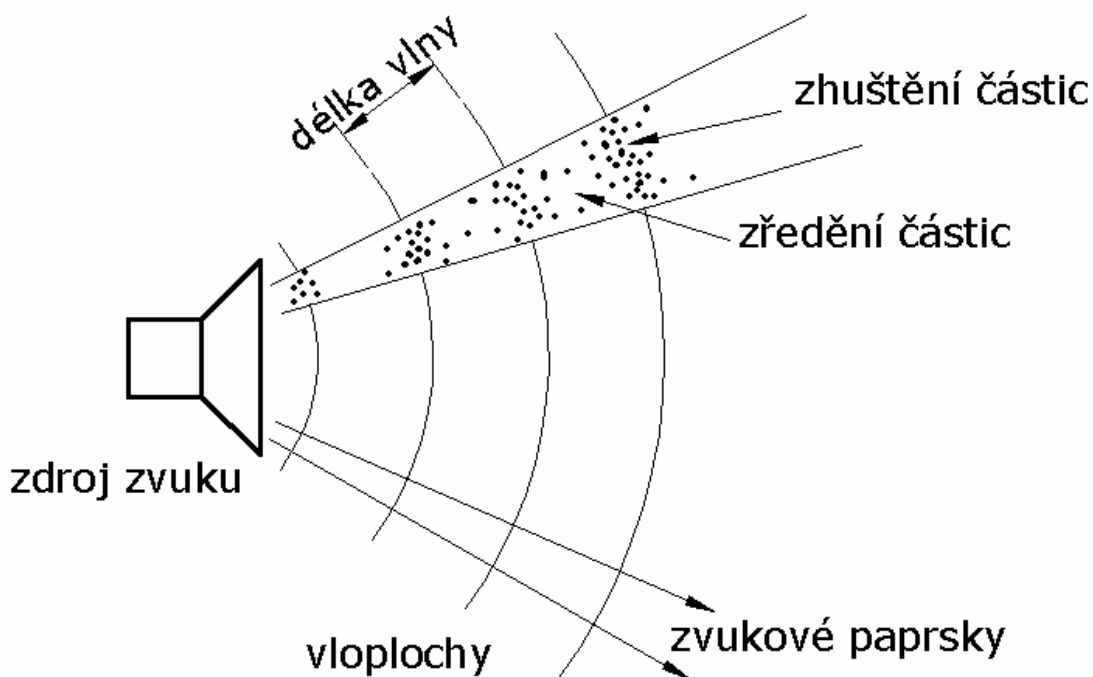
Jak bylo uvedeno výše, zvukem nazýváme mechanické vlnění pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu slyšitelnosti lidského ucha, tj. 16 až 20 000 Hz. Toto mechanické vlnění se šíří konečnou rychlostí daným pružným prostředím. Například ve vzduchu se toto mechanické vlnění šíří rychlostí okolo 340 m/s od místa vzruchu jiných médiích je tato rychlost podstatně vyšší. Například u vody je to 1500 m/s a u oceli dokonce 5000 m/s. zvuk se může šířit v kapalinách, plynech i pevných látkách. [3]

Mechanickými kmity pružného prostředí se přenáší mechanická energie kmitajících částic, a to od zdroje prostřednictvím akustických vln. Vlnění postupuje od zdroje ve vlnoplochách ve směru zvukového paprsku a to tzv. rychlostí zvuku. Vlnoplochy jsou plochy v prostoru se stejnými akustickými veličinami. Zvukový paprsek je vždy kolmý na příslušné vlnoplochy. [4]

Částice prostředí se s postupující akustickou vlnou zhušťují a zředňují. Částice kmitají kolem svých rovnovážných poloh a zásadně se nepohybují se šířící se vlnou. Podle toho, zda částice kmitají ve směru vlnění nebo kolmo k němu, dělíme vlnění na podélné nebo příčné. [5]

U plynů a kapalin se vyskytuje pouze vlnění podélné, neboť tyto látky jsou pružné pouze ve smyslu objemové stlačitelnosti. U materiálů pevných se vyskytuje vlnění podélné i

příčné, protože tyto materiály vykazují pružnost nejenom v tahu a tlaku ale i smyku. Kombinací těchto deformací vzniká i kmitání ohybové (prutů, desek). [5]



Obr. 11 Vlnění v pružném prostředí [5]

2.2.2 Základní veličiny v akustice

Vlnová délka $\lambda[m]$ je vzdálenost dvou po sobě časově následujících např. minim kmitů vlny u sledovaného vlnění. Obecně je to vzdálenost mezi nejbližšími vlnoplochami se stejnými akustickými stavy kmitajících částic. Lze ji také definovat jako vzdálenost, kterou urazí zvuková vlna za dobu jednoho kmitu, tedy periodu T . [5]

Jestliže se akustická vlna od zdroje šíří rychlostí zvuku c a vlnění je s frekvencí f , pak pro vlnovou délku platí vztah:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1}{T} [m], \quad (3)$$

kde $f [Hz]$ je frekvence vlnění, $c [m/s]$ je rychlost šíření vlnění (rychlost zvuku) a $T [s]$ je perioda vlnění [5]

Rychlost šíření akustických vln v pevných látkách je obecně velmi složitá úloha. Je totiž nutno do příslušných vztahů zahrnout i vliv kontrakce materiálu ve formě Poissonova poměru:

$$\mu = \frac{E - G}{2G}, \quad (4)$$

kde E [Pa] je modul pružnosti materiálu v tahu a G [Pa] je modul pružnosti ve smyku.

Na základě výše uvedených veličin pak lze odvodit vztahy pro:

- Podélné vlny

- v tenkých tyčích

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [m/s] \quad (5)$$

- v desce

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{1 - \mu^2}} \quad [m/s], \quad (6)$$

kde ρ [kg / m³] je hustota prostředí. [5]

- Příčné vlny

Obdobný vztah (5) lze použít i pro rychlost šíření příčných vlnaří záměně modulů pružnosti tedy:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad [m/s] \quad (7)$$

Dosažením z rovnice (4) získáme výraz, který ukazuje, že poměr rychlostí podélných a příčných vln je pro daný materiál konstantní:

$$\frac{c_L}{c_T} = \sqrt{\frac{2(1 + \mu)}{1 - \mu^2}} \quad (8)$$

Rychlost šíření vlnění nezávisí na jeho frekvenci. Vztah (7) pak přejde na tvar:

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \mu)}} \quad [m/s] \quad (9)$$

Pro výpočet rychlostí zvuku je nutno ovšem použít dynamické moduly pružnosti příslušných materiálů, které mohou být 5 až 20 krát vyšší než odpovídající statické hodnoty. [5]

- Ohybové vlny

U tyčí a desek často dochází ke skládání podélného a příčného vlnění v tzv. ohybové vlnění, jež se šíří rychlostí:

$$c_B = \sqrt{2\pi \cdot f} \cdot \sqrt[4]{\frac{4E \cdot I}{m}} \quad [m/s], \quad (10)$$

kde $I [m^4]$ je moment setrvačnosti průřezu tyče, $f [Hz]$ je frekvence vlnění a $\bar{m} [kg/m]$ je hmotnost jednotkové délky tyče.

Pro materiály obdélníkového průřezu lze rovnici (10) vyjádřit:

$$c_B = \sqrt{1,8 \cdot c_L \cdot h \cdot f}, \quad (11)$$

kde $h [m]$ je výška průřezu tyče.

Rychlost šíření vln je závislá na:

- materiálu
- rozměru tyče
- frekvenci vlnění šířeného ve vzorku.

Z hlediska šíření a vyzařování zvuku je ohybové vlnění nejnebezpečnější, neboť při něm dochází k výraznému přenosu energie z kmitajícího povrchu tělesa do okolního vzdušného nebo kapalného prostředí. [5]

2.2.3 Podmínka vzniku vlnění

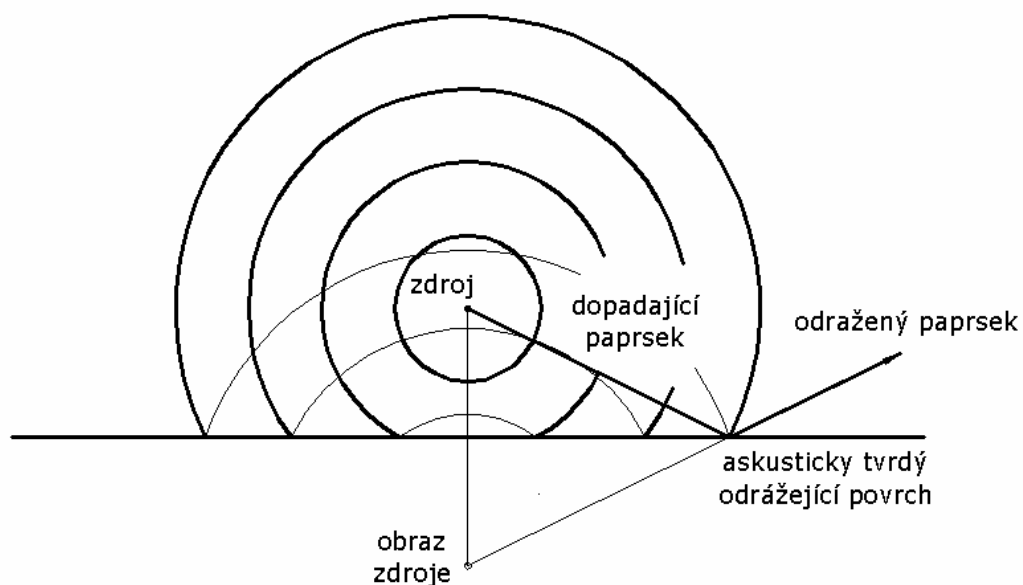
Hlavní podmínkou pro vznik vlnění v určitém materiálu je, aby jeho nejdelší rozměr $l [m]$ byl minimálně roven poloviční délce příslušné vlny.

Například pro podélné vlny musí platit:

$$l \geq \frac{\lambda}{2} = \frac{c_L}{2f} \quad [m] \quad (12) [5]$$

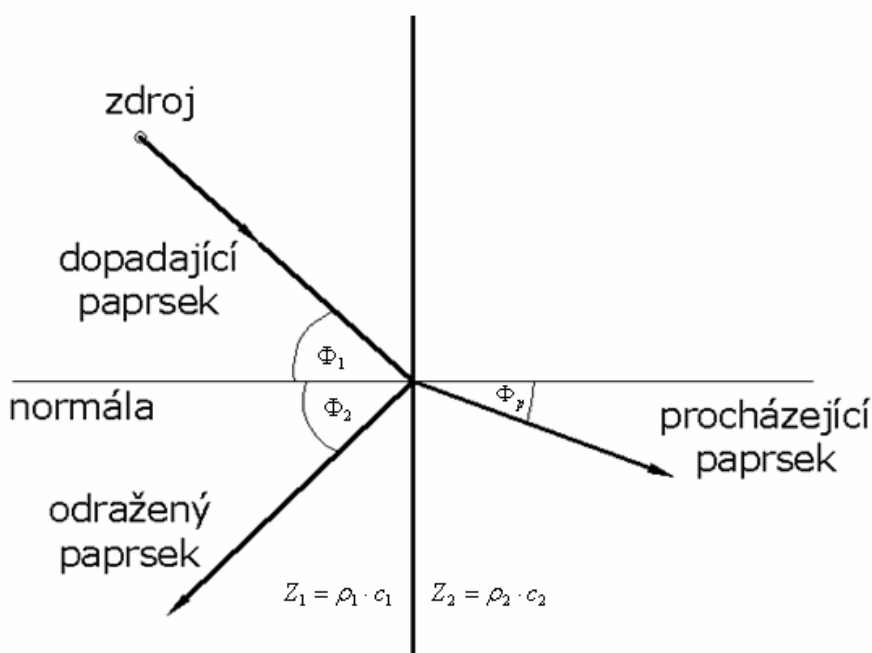
2.3 Odraz a průchod zvuku

Při dopadu akustické vlny na rovinnou plochu s ideální odrazivostí se tato vlna od roviny odráží, podobně jako se odráží světelný paprsek od zrcadla.



Obr. 12 Odraz akustické vlny [5]

Pokud rovinná akustická vlna, pohybující se v homogenním prostředí dopadne na rovinné rozhraní s jiným médiem, pak se obecně část vlnění odráží a část prochází druhým médiem. Podíl odraženého a procházejícího vlnění závisí na úhlu dopadu vlny na rovinné rozhraní, na rychlostech zvuků a hustotách obou materiálů na obou stranách rozhraní. [5]



Obr. 13 Dopad paprsku na rozhraní [5]

Na obr. 15 jsou dopadové úhly od normály značeny jako $\Phi_{1,2,p}$. Jestliže rovinná vlna dopadne na rovinné rozhraní pod úhlem ϕ_1 ($\phi_1 = 0$ je kolmý dopad), úhel odrazu akustické vlny bude $\phi_2 = \phi_1$, avšak úhel lomu procházejícího paprsku za rozhráním závisí na poměru rychlostí zvuků v obou materiálech podle Snellova pravidla:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \Phi_1}{\sin \Phi_2} \quad (13)$$

Pokud je rozhraní mezi tekutinami (plyny a kapalinami) nebo mezi tekutinou a pórovitým absorpčním materiálem. Generují se pouze podélné vlny. Avšak na rozhraní mezi tekutinou a pevnou látkou se v pevné látce vlněním přenáší energie prostřednictvím podélných i příčných vln. [5]

Zde se pokračující podélné vlnění přiklání k normále k rozhraní, pokud platí $c_2 > c_1$. Jestliže $c_2 < c_1$, procházející podélná vlna se objevuje pouze při úhlu incidence v rozmezí

$$0 \leq \Phi_1 \leq \Phi_{IL} = \arcsin\left(\frac{c_1}{c_2}\right). [5]$$

Pro úhly $\Phi_1 \geq \Phi_{IL}$ dochází k celkovému odrazu vlnění a akustická vlna vniká do druhého média pouze ve tvaru blízkého pole, které exponenciálně ubývá se vzdáleností od rozhraní.

Mezi-úhel ve $[\circ]$ pro přenos zvuku s rovinnou vlnou na rozhraní např. vzduch ocel je pro podélné vlny

$$\Phi_{CL} = \arcsin\left(\frac{c_O}{c_L}\right) = 3,8^\circ \quad (14)$$

Pro příčné vlny

$$\Phi_{TC} = \arcsin\left(\frac{c_O}{c_T}\right) = 4,5^\circ \quad (15)$$

Pro úhly incidence větší než jsou tyto výše uvedené hodnoty, dochází k celkovému odrazu vln. [5]

2.4 Pohlcování zvuku

Jestliže akustická vlna dopadne na povrch např. pevného média, pak se část energie vlnění přeměňuje na jiný druh energií (nejčastěji tepelnou). Akustická absorpce (pohltivost) je definovaná jako podíl energie absorbované povrchem k energii dopadající na povrch čili rozhraní je definována součinitelem pohltivosti α dle vztahu.

$$\alpha = \frac{\text{energie dopadající}}{\text{energie absorbovaná}} = 1 - |R^2|, \quad (16)$$

kde R $[-]$ součinitel odrazu, je definován jako podíl akustických tlaků odražené a dopadající akustické vlny. Součinitel pohltivosti je v rozmezí $0 \leq \alpha \leq 1$, přičemž $\alpha = 0$, odpovídá nulové pohltivosti, $\alpha = 1$ maximální pohltivosti rozhraní. Při $\alpha = 1$ je veškerá energie vlnění pohlcována rozhraním, tedy povrchem dalšího média. Absorpce povrchů různých materiálů je funkcí mnoha parametrů, včetně efektivní drsnosti povrchu, jeho pórovitosti, poddajnosti a v některých případech i jeho rezonanční vlastnosti. Pro kolmý dopad vzdušné akustické vlny na rozhraní s akustickou impedancí Z_1 (podíl akustického tlaku a normálové složky rychlosti částic na rozhraní) je součinitel odrazu dán vztahem:

$$R = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}, \quad (17)$$

kde $Z_0 = \rho_0 \cdot c_0$ je charakteristická impedance vzduchu, ρ_0 je hustota vzduchu, c_0 je rychlost zvuku ve vzduchu. [5]

2.4.1 Mechanismus pohlcování zvuku

Pohlcováním zvuku máme na mysli přeměnu zvukové energie na energii jinou obvykle tepelnou. Z hlediska použití můžeme zvukově-pohltivé látky rozdělit do dvou skupin. První skupina zahrnuje látky a konstrukce, jejichž účelem je pohlcovat zvukové vlny dopadající na jejich povrch, při čemž se obvykle nezajímáme o to, zda je zvuk skutečně látkou pohlcen a přeměněn v energii jinou. Tyto látky se používají pro účely architekturní akustiky a snižování hladiny hluku zvýšením pohltivosti stěn. Naopak druhá skupina látek a konstrukcí se používá pro účely zvukově izolační, a proto se u nich zajímáme o to, do jaké míry dochází k útlumu zvuku při jeho šíření látkou. Pohlcováním zvuku rozumíme nevratnou přeměnu zvukové energie v energii jinou.

Z toho hlediska můžeme způsob přeměny zvukové energie při šíření v pevných látkách rozdělit na 3 druhy:

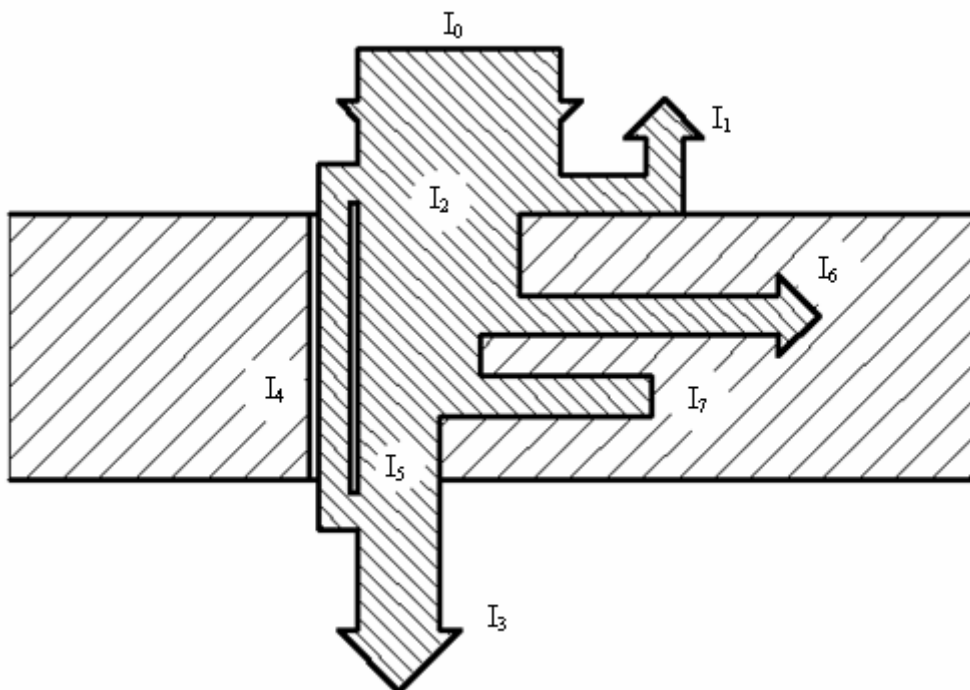
- přeměny vznikající třením
- přeměny vznikající poklesem akustického tlaku
- přeměny vznikající nepružnou deformací těles. [1]

K přeměně akustické energie vlivem tření dochází tehdy, pohybuje-li se vzduch v blízkosti pevné stěny. Aby bylo přeměněno dostatečné množství energie, musí být plocha, na níž nastává tření, značně veliká. Proto se k tomuto druhu pohlcování zvuku dobře hodí látky porézní, u nichž se zvuk šíří v látce jemnými póry, jejichž celková plocha je značně veliká.

Při šíření zvukové vlny látkou, dochází v určitých místech ke zhuštění částic a současně stoupá celkový tlak. Jestliže dojde z jakýchkoli důvodů ke snížení neboli relaxaci tlaku, sníží se i potenciální energie nashromážděná v uvažovaném místě a tím se zmenší i energie zvukové vlny. Příčin relaxace akustického tlaku může být několik. Při stlačení dojde ke stoupaní teploty, a jelikož soustava pórů není od kostry tepelně izolována, dojde k přestupu tepla ze vzduchu do kostry. Přejít tepla má za následek snížení teploty vzduchu a tím i tlaku v uvažovaném místě. Jiný způsob relaxace tlaku nastává při šíření zvuku pevnými látkami nebo pevnou kóstrou nějaké porézní látky. Mění-li se například u vláknité látky průřez kostry, dochází v místech malého průřezu ke značnějšímu stoupaní teploty, a jestliže je látka dobrým vodičem tepla, dojde k vyrovnání teplot s okolím a tím opět k relaxaci tlaku. Relaxace tlaku nastává především při šíření příčného vlnění kovovými deskami, které vedou dobře teplo. Při ohybu totiž dochází k částečnému vyrovnávání teplot mezi stlačenou, zahřátou stranou a stranou roztaženou, ochlazenou. [1]

2.4.2 Činitel zvukové pohltivosti

Energie dopadající na překážku se dělí do několika částí.



Obr. 14 Rozdělení energie dopadené na překážku

Na Obr. 14 je I_0 [W/m^2] akustický výkon dopadající na 1m^2 stěny, I_1 je akustický výkon odražený, I_2 [W/m^2] je akustický výkon pohlcený, I_3 [W/m^2] je akustický výkon vyzářený za stěnu, I_4 [W/m^2] je akustický výkon prošlý za stěnu otvory nebo póry, I_5 [W/m^2] je akustický výkon který stěna vyzáří v důsledku svého kmitání, I_6 [W/m^2] je akustický výkon vedený ve formě chvění do ostatních částí konstrukce a I_7 [W/m^2] je akustický výkon přeměněný na teplo. [1]

Schopnost tělesy pohlcovat zvuk charakterizujeme hodnotou činitele zvukové pohltivosti α .

$$\alpha = \frac{I_2}{I_0} \quad (18)$$

Činitel pohltivosti je bezrozměrné číslo, jehož velikost se může pohybovat v intervalu od 0 do 1. Stěna pohlcující zvuk úplně má činitel pohltivosti roven jedné zatím co stěna, dokonale zvuk odrážející má tento činitel roven nule. Analogicky lze definovat činitele zvukové odrazivosti β . [1]

$$\beta = \frac{I_1}{I_0} \quad (19)$$

A činitele průzvučnosti

$$\tau = \frac{I_3}{I_0} = \frac{I_4 + I_5}{I_0} \quad (20)$$

Při navrhování zvukově-izolačních krytů je však bezpodmínečně nutné znát podíl akustické energie skutečně přeměněné na teplo. Činitel přeměny akustické energie na teplo se značí ε .

$$\beta + \tau + \varepsilon = 1 \quad (21)$$

Z pozorování ostatních vztahů vyplývá: [1]

$$\alpha = \varepsilon + \tau \quad (22)$$

2.4.3 Měření činitele zvukové pohltivosti

- Metoda přenosové funkce (ČSN ISO 10534-2)

Metoda přenosové funkce zahrnuje použití impedanční trubice, dvou míst mikrofonů a digitálního systému k vyhodnocování frekvenční závislosti k určení činitele zvukové pohltivosti α akustických obkladů při kolmém dopadu zvuku. Tento způsob je podobný zkušební metodě poměru stojaté vlny uvedené dle ČSN ISO 10534-1 v tom, že používá impedanční trubici se zdrojem zvuku připevněným na jednom konci a na druhém konci se zkušebním vzorkem. Postup měření je však odlišný. V této metodě se měří akustický tlak dvěma mikrofony, čímž docílíme rozkladu interferenčního pole. Tato zkušební metoda je považována za alternativní a je časově méně náročná než metoda poměru stojaté vlny. [20]

Princip spočívá v upevnění vzorku do hladké, tuhé a utěsněné impedanční trubice. Zdroj hluku (náhodný signál, pseudonáhodný sled nebo přeladovaný tón) produkuje rovinné akustické vlny a dvěma mikrofony měříme akustický tlak poblíž místa umístění vzorku. Určí se komplexní akustická přenosová funkce dvou mikrofonních signálů a ty se použijí k získání hodnoty činitele zvukové pohltivosti při kolmém dopadu. Tuto metodu lze použít také k určení akustické povrchové impedance nebo admitance pohltivých materiálů. Protože se akustická impedance materiálu vztahuje k jeho fyzikálním vlastnostem (poréznost, pružnost, hustota,...), jsou příslušná měření užitečná pro výzkum a vývoj výrobků. [20]

Vztah pro určení činitele zvukové pohltivosti je dán rovnicí

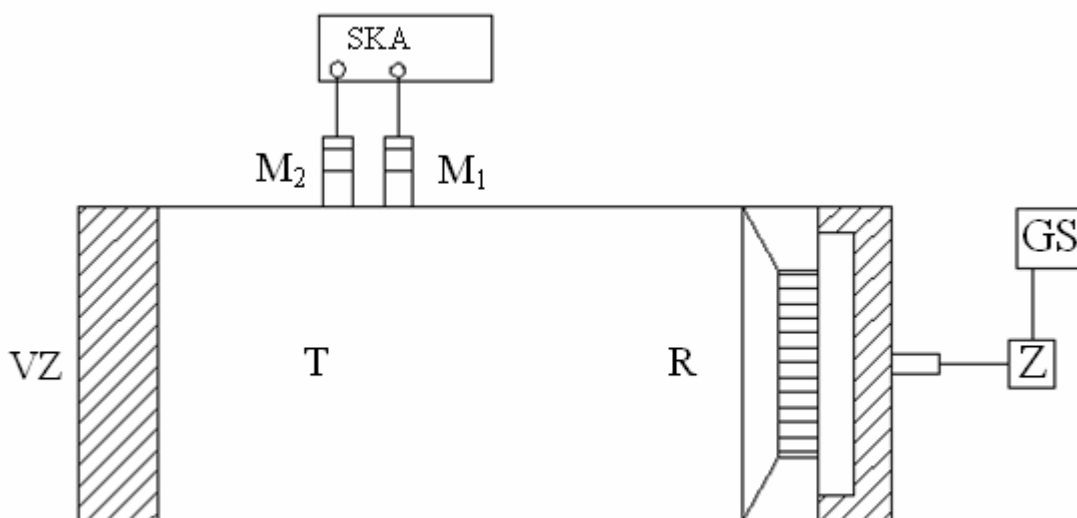
$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2, \quad (23)$$

kde r [-] je činitel odrazu akustického tlaku, r_r [-] je reálná složka činitele odrazu akustického tlaku, r_i [-] je imaginární složka činitele odrazu akustického tlaku.

Příčemž je tento činitel dán vztahem

$$r = \frac{H_{1,2} - H_I}{H_R + H_{1,2}} \cdot e^{2k_0 \cdot x_0 \cdot i}, \quad (24)$$

kde $H_{1,2}$ je přenosová funkce mezi místy 1 a 2, H_I je přenosová funkce pro samotnou dopadající vlnu, H_R je přenosová funkce pro samotnou odrážející vlnu, k_0 je komplexní vlnové číslo, x_0 je vzdálenost mezi vzorkem a vzdálenějším mikrofonem od něj, i je imaginární jednotka. [20]



Obr. 15 Princip měření činitele zvukové pohltivosti v Kundtově impedanční trubici metodou přenosové funkce [12]

Na Obr. 15 je zobrazena Kundtova trubice která obsahuje, mikrofony M_1 a M_2 , reproduktor R, zdroj zvuku Z, impedanční trubici T, vzorek VZ a vyhodnocovací zařízení SKA.

- Metoda dozvukové komory (ČSN EN ISO 354)

Podstatou této metody je určení činitele zvukové pohltivosti poměrem ekvivalentní pohltivé plochy zkušební vzorku k ploše zkušební vzorku. Ekvivalentní pohltivá plocha A_T se vypočítá pomocí Sabineovy rovnice dle normy ČSN EN ISO 354 na základě dvou průměrných dob dozvuku. Tyto doby dozvuku se měří v dozvukové místnosti s namontovaným zkušebním vzorkem a bez něj. Pokud zkušební vzorek rovnoměrně pokrývá povrch (rovinné pohltivé obklady), pak činitele zvukové pohltivosti získáme podílem ekvivalentní pohltivé plochy A_T ku vyšetřované ploše S . [19]

Dobu dozvuku místnosti v určitém frekvenčním pásmu vyjádříme aritmetickým průměrem celkového počtu měření doby dozvuku příslušného frekvenčního pásma. Průměrné doby dozvuku místnosti T_1 a T_2 vypočítáme a vyjádříme s přesností minimálně na dvě desetinná místa. [19]

Ekvivalentní plochu prázdné dozvukové místnosti vypočítáme pomocí vztahu

$$A_1 = \frac{55,3 \cdot V}{c \cdot T_1} - 4Vm_1 \quad (25)$$

Analogicky pro plochu dozvukové místnosti se vzorkem

$$A_2 = \frac{55,3 \cdot V}{c \cdot T_2} - 4Vm_2, \quad (26)$$

kde V [m^3] je objem prázdné dozvukové komory, c [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je rychlost šíření zvuku ve vzduchu, T_1 [s] je doba dozvuku prázdné dozvukové komory, T_2 [s] je doba dozvuku dozvukové komory obsahující vzorek, m_1 [m^{-1}] je součinitel útlumu ve vzduchu s ohledem na klimatické podmínky, které panovaly v prázdné dozvukové komoře a m_2 [m^{-1}] je součinitel útlumu ve vzduchu s ohledem na klimatické podmínky, které panovaly v dozvukové komoře při vložení vzorku.

Ekvivalentní plochu A_T tedy určíme ze vztahu

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad (27)$$

Konečný vztah pro výpočet koeficientu zvukové pohltivosti bude následovný [19]

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (28)$$

- Metoda poměru stojaté vlny (ČSN ISO 10534-1)

Touto metodou určujeme činitele zvukové pohltivosti, odrazu a povrchové impedance nebo admitance materiálů. Hodnoty určujeme pouze pro kolmý dopad zvuku vyhodnocením pole rovinné stojaté vlny v impedanční trubici. Principem spočívá v upevnění vzorku do jednoho, těsně uzavíratelného konce rovné, tuhé a hladké impedanční trubice. V opačném konci trubice je umístěn reproduktor, který budí sinusovou zvukovou vlnu, jež na vzorek dopadá. V trubici vzniká stojatá vlna superpozicí dopadající vlny p_i a vlny odražené od zkušební vzorku p_r . [18]

$$p = p_i + p_r \quad (29)$$

Hodnotíme amplitudy akustického tlaku v tlakových minimech a maximech. Z těchto údajů již můžeme dle normy ČSN ISO 10534-1 určit činitele zvukové pohltivosti α .

Tlakové maximum vzniká tam, kde jsou p_i a p_r ve fázi

$$|p_{\max}| = |p_0| \cdot (1 + |r|) \quad (30)$$

Tlakové minimum vzniká tam, kde jsou p_i a p_r ve fázi

$$|p_{\min}| = |p_0| \cdot (1 - |r|) \quad (31)$$

Protože v impedanční trubici měříme akustický tlak v logaritmickém měřítku (v decibelech) a rozdíl hladin mezi tlakovým maximum a tlakovým minimum je ΔL [dB], pak platí

$$s = 10^{\Delta L / 20} \quad (32)$$

Konečný vztah pro určení činitele zvukové pohltivosti α je

$$\alpha = \frac{4 \cdot 10^{\Delta L / 20}}{\left(10^{\frac{\Delta L}{20}} + 1\right)^2} \quad (33)$$

Tato metoda je vhodná pro vyšetřování parametrů a navrhování akustických obkladů, neboť vyžaduje malé vzorky zkoumaného pohltivého materiálu. [18]

2.5 Měření hluku

Mezi základní veličiny v oblasti měření zvuku (hluku) patří akustický tlak p [Pa], který je namodulován na barometrický tlak. Při energetickém hodnocení zvuku se lze setkat s pojmem akustický výkon P [W], který je definován vztahem [21]

$$P = \frac{\delta E}{\delta \tau} \quad (34)$$

A s intenzitou zvuku I [$W \cdot m^{-2}$], která je dána vztahem

$$I = \frac{\delta P}{\delta S} \quad (35)$$

Ve vztazích (34) a (35) představuje E [J] akustickou energii, τ [s] je čas a S [m^2] je plocha.

Vzhledem k tomu, že akustický tlak, akustický výkon a intenzita zvuku vnímané člověkem jsou v rozpětí několika řádů a lidský vjem jim není lineárně úměrný, používá se pro hodnocení akustického pole tzv. hladiny akustických veličin, jejichž jednotkou je decibel. Hladina akustického tlaku je dána vztahem

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0}, \quad (36)$$

kde p [Pa] je efektivní hodnota akustického tlaku a $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa je referenční hodnota akustického tlaku pro šíření ve vzduchu. Hladina akustického výkonu je dána vztahem

$$L_w = 10 \log \frac{P}{P_0}, \quad (37)$$

kde $P_0 = 10^{-12}$ W je referenční hodnota akustického výkonu. Hladinu akustické intenzity lze definovat rovnicí

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}, \quad (38)$$

kde $I_0 = 10^{-12}$ W.m⁻² je referenční hodnota akustické intenzity. Uvedené hladiny akustických veličin jsou navzájem závislé a platí

$$L_I = 20 \log \frac{P_{ef}}{P_{0ef}} + 10 \log \frac{\rho_0 \cdot c_0}{\rho \cdot c} \approx L_p - 0,2, \quad (39)$$

kde ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] je hustota prostředí, c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] je rychlost zvuku a pro běžné klimatické podmínky lze druhý člen na pravé straně rovnice nahradit přibližně hodnotou 0,2. Rovněž platí

$$L_w = 10 \log \frac{I}{I_0} + 10 \log \frac{S}{S_0} = L_I + 10 \log S, \quad (40)$$

kde S [m^2] je plocha a $S_0 = 1\text{m}^2$ je referenční plocha. Vztahy (39) a (40) lze využít pro přepočítání hodnot hladin akustického tlaku naměřených zvukoměrem na často požadované hladiny akustického výkonu. [21]

Pro úpravu citlivosti zvukoměru v souladu s kmitočtovými závislostmi lidského sluchu se měření provádějí s definovanými filtry. V praxi se lze setkat s filtry typu A, B, C, jejichž útlum $\Delta L[\text{dB}]$ je v závislosti na frekvenci f [Hz]. Přičemž většina norem a předpisů dává přednost pouze filtru typu A. Údaj naměřený zvukoměrem se zařazeným váhovým filtrem A je hladina hluku L_A [dB(A)], která podle ČSN ISO 1996-1 je definována jako hladina akustického tlaku frekvenčně váženého filtrem A a je označena L_{pA} [dB]. Dále se lze setkat s pásmovými filtry o velikosti jedné oktávy nebo třetiny oktávy, nebo také kmitočtovými analyzátory propouštějícími složky hluku pouze v úzkém plynule stavitelném frekvenčním pásmu, které pak umožňují detailnější tzv. pásmovou analýzu zvuku. Oktávové frekvenční pásmo je charakterizováno poměrem krajních frekvencí. [21]

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \quad (41)$$

A třetinové frekvenční pásmo je charakterizováno poměrem krajních frekvencí

$$\frac{f_2}{f_1} = \sqrt[3]{2} \quad (42)$$

Tab. 2 Střední frekvence v oktávových pásmech

| Číslo oktávy | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------|------|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------|
| f_m [Hz] | 31,5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 16000 |

Střední frekvenci v každém frekvenčním pásmu je možné určit ze vztahu

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad (43)$$

Z naměřených hladin akustického tlaku v oktávových pásmech lze určit tzv. číslo třídy hluku N, které svou hodnotou charakterizuje nebezpečnost hluku především se zřetelem ke škodlivému působení na sluch. Jeho hodnota se určí jako nejvyšší hodnota třídy hluku z naměřených hladin akustického tlaku v oktávových pásmech 31,5 Hz až 8000 Hz, a to dle tabulek nebo diagramu. [21]

3 ÚVOD DO SDÍLENÍ TEPLA

3.1 Základní pojmy

Teplu je forma energie, která může přecházet z jednoho energetického stavu do stavu druhého a teplota je míra vnitřní energie (součást translačních, vibračních a rotačních systémů). Teplu mohou sdílet dva systémy (těleso a okolí) pouze v případě rozdílné teploty obou systémů. Tepelný tok je roven teplu za jednotku času a je závislý na rozdílu teplot nikoli na absolutních hodnotách teplot.

Sdílení tepla : teplo tepelný tok

$$Q = c_p \cdot m \cdot (t_2 - t_1) \quad (18) \qquad \dot{Q} = c_p \cdot \dot{m} \cdot (t_2 - t_1), \quad (44)$$

kde C_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] je měrná tepelná kapacita, m [kg] je hmotnost a t_1, t_2 jsou teploty daných systémů.

Existují tři základní mechanismy sdílení tepla:

- vedením
- prouděním
- sáláním

Spojením vedení a proudění vzniká tzv. prostup tepla. [10]

3.2 Vedení tepla

Sdílení tepla vedením neboli kondukcí je šíření mechanických forem energie mikroskopického pohybu jeho částic (molekul, atomů). Je to způsob typický pro šíření tepla v látkách pevných. Existuje sice i v tekutinách (kapalinách i plynech) zde však bývá zastřeno makroskopickým pohybem (prouděním). Jeho existence se měřitelně prokáže teprve v případech, kdy je makroskopický pohyb potlačen např. v úzkých mezerách, v drobných dutinách porézních materiálů apod. [22]

Vedení neboli kondukcce je molekulární mechanismus sdílení tepla. Nastává předáváním kinetické energie mezi molekulami a elektrony vlivem teplotních rozdílů.

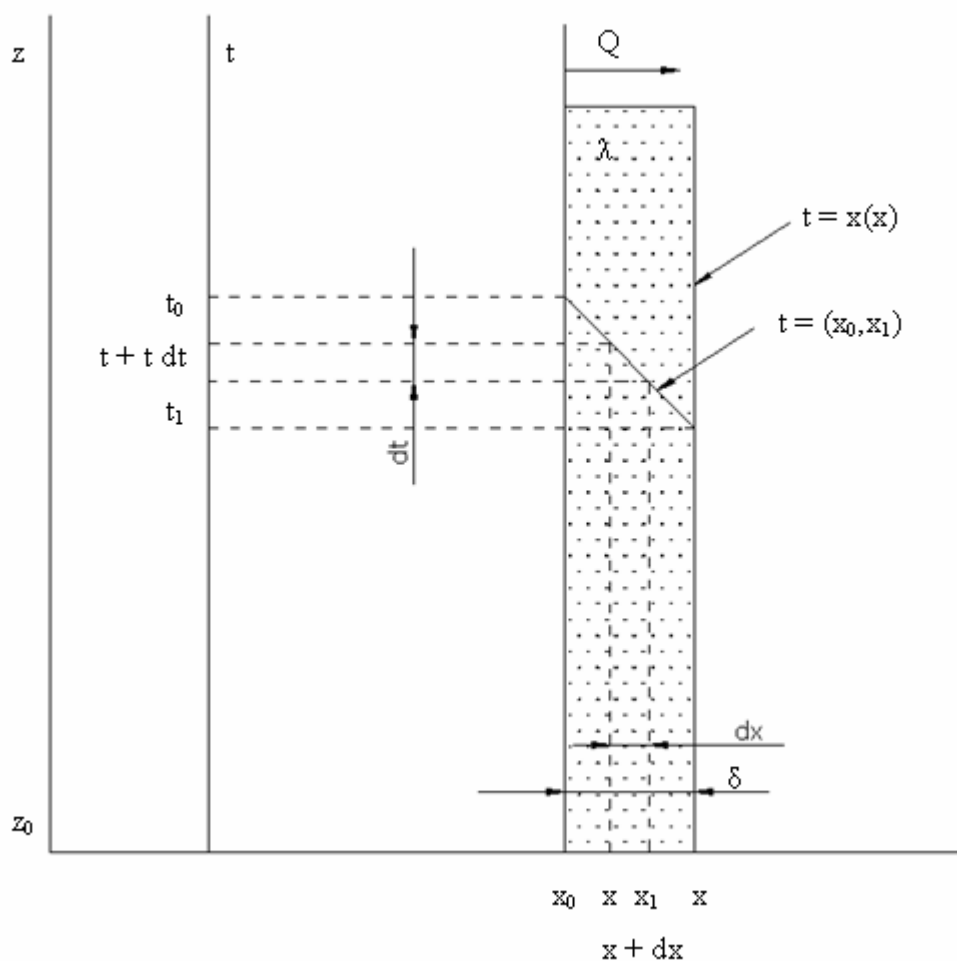
Fourierův zákon vedení tepla :

$$d\dot{Q} = -\lambda \frac{dt}{dx} dA \quad (45)$$

Po integraci (deska):

$$\dot{Q} = \lambda \frac{t_0 - t_1}{\delta} dA, \quad (46)$$

kde A je teplosměnná plocha [m^2] a λ je součinitel tepelné vodivosti [$Wm^{-1} \cdot K^{-1}$] $\equiv [kg \cdot m \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}]$



Obr. 16 Rozdělení teploty t napříč deskou (teplotní profil)

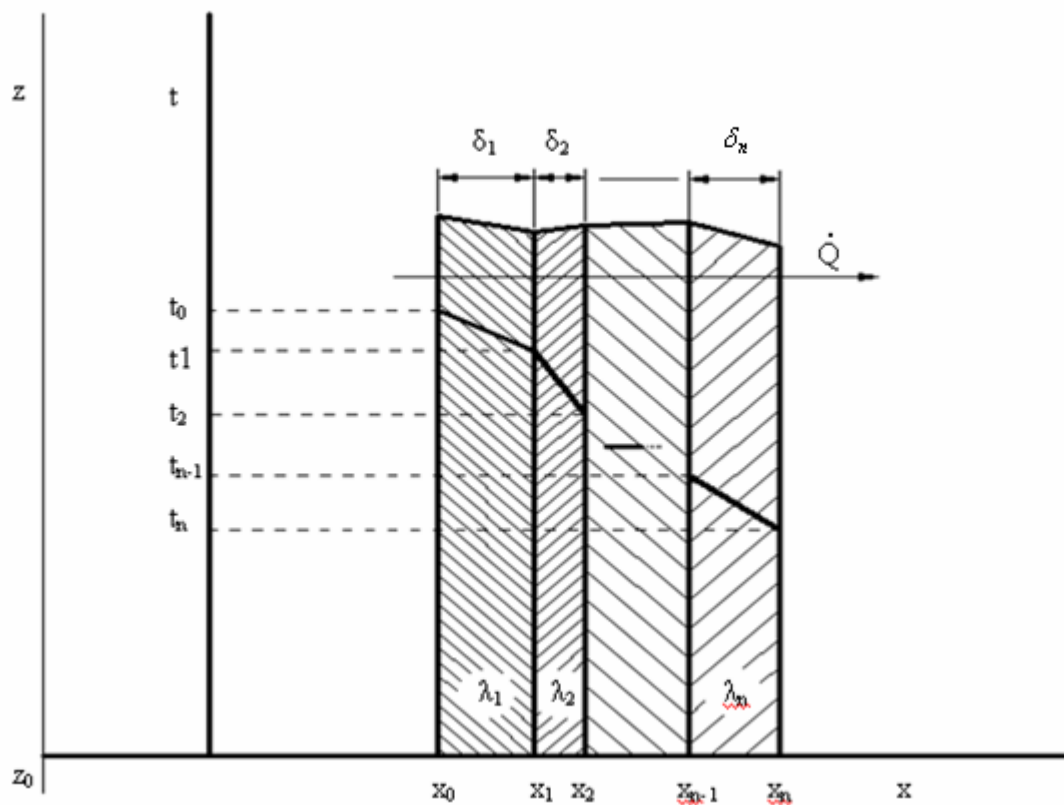
Vedení tepla ve složené deskové stěně:

$$\dot{Q}_1 = \lambda_1 \frac{t_0 - t_1}{\delta_1} A \quad (47)$$

$$\dot{Q}_2 = \lambda_2 \frac{t_1 - t_2}{\delta_2} A \quad (48)$$

$$\dot{Q}_n = \lambda_n \frac{t_{n-1} - t_n}{\delta_n} A \quad (49)$$

$$\dot{Q} = \frac{t_0 - t_n}{\sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{\lambda_j}} A \quad (50)$$

Obr. 17 Rozdělení teploty t napříč složenou deskou [10]

3.2.1 Součinitel tepelné vodivosti λ

Součinitel tepelné vodivosti je fyzikálním parametrem a vedení tepla látky. Pro stejný materiál je hodnota λ [$Wm^{-1} \cdot K^{-1}$] mění vlivem různých podmínek jako je: teplota, vlhkost, hustota, struktura a další. [10]

Tab. 3 Vybrané hodnoty λ při teplotě 20°C [7]

| Materiál | λ [$Wm^{-1} \cdot K^{-1}$] |
|----------------------------|--------------------------------------|
| Měď | 395 |
| Mosaz | 106 |
| Ocel 0,2% C | 50 |
| Beton armovaný | 1,5 |
| Cihly | 0,28 - 1,2 |
| Tabulkové sklo | 0,6 - 1 |
| Tepelně izolační materiály | |
| Pěnový polystyren | 0,04 |
| Lehčený polyuretan | 0,033 |
| Suchý vzduch | 0,027 |
| Voda | 0,6 |

Odpor proti vedení tepla:

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad (51) [10]$$

3.3 Proudění tepla

Zde se teplo sdílí makroskopickým pohybem tekutiny, při němž teplejší makroskopické částice tekutiny přicházejí do míst o nižší teplotě a naopak, při čemž se uplatňuje i disipační vzrůst vnitřní energie v laminárním i turbulentním typu proudění. Je-li proudění tekutiny vyvoláno uměle čerpáním, ofukováním, výraznými přeměnami tlakové energie v energii kinetickou, pohybem tělesa v tekutině apod. mluvíme o tzv. konvekci vynucené. [22]

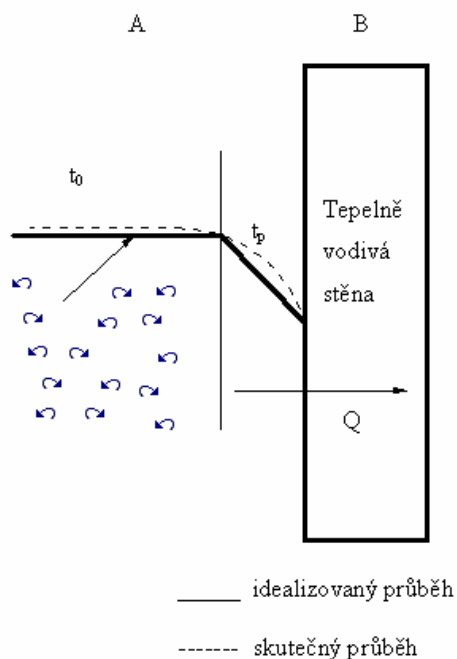
Je-li proudění způsobeno pouze teplotními rozdíly, přičemž teplejší částice s nižší hustotou vlivem Archimedova vztlaku odplývají do poloh s vyšší potenciální energií, jedná se o tzv. konvekci volnou. [22]

Proudění neboli také konvekce je sdílení tepla mezi povrchem a prostředím z místa o vyšší teplotě na místo s nižší teplotou.

Newtonův ochlazovací zákon po integraci:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot \langle t_0 \rangle \dots t_p \cdot A, \quad (52)$$

kde A je teplosměnná plocha, $\langle t_0 \rangle$ je střední teplota tekutiny, t_p – teplota povrchu stěny u tekutiny a α je součinitel přestupu tepla.



Obr. 18 Průběh teplot u stěny

[10]

3.3.1 Výpočet součinitele přestupu tepla α

Výpočet součinitele přestupu tepla α závisí na tom, o jaké proudění jde. Dělí se na dvě základní skupiny, beze změny skupenství a se změnou skupenství. Při proudění, kde se skupenství nemění hovoříme buď o volné konvekci anebo o nucené konvekci, která se dále rozlišuje podle druhu systému na duplikátory nebo trubkové systémy. Při proudění, kde se skupenství mění hovoříme o kondenzaci, či varu, podle toho jaký z daných dějů při proudění probíhá.

Kriteriální rovnice:

$$Nu - \text{Nusseltovo kritérium} \quad Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (53)$$

$$Pe - \text{Pécletovo kritérium} \quad Pe = Re \cdot Pr = \frac{v \cdot l}{a} \quad (54)$$

$$\text{Re} - \text{Reynoldsovo kritérium} \quad \text{Re} = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\eta} \quad (55)$$

$$\text{Pr} - \text{Prandtlovo kritérium} \quad \text{Pr} = c_p \frac{\eta}{\lambda} \quad (56)$$

$$\text{Gr} - \text{Grasshofovo kritérium} \quad \text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3}{\nu^2} \Delta t \quad (57)$$

Postup při výpočtu součinitele přestupu tepla z empirických rovnic.

- a) o jaký druh konvekce se v daném případě jedná.
- b) vybereme vhodný vztah nebo skupinu vztahů.
- c) Zjistíme, jak jsou voleny charakteristické veličiny.
- d) Pokud tvar vztahů nebo hodnoty konstant ve vybraném vztahu závisí na hodnotách některých nezávisle proměnných (u nucené konvekce je to například Re)
- e) Vypočteme hodnoty všech potřebných bezrozměrných argumentů a zjistíme, zda naše podmínky lež uvnitř oboru platnosti vztahu, který chceme použít.
- f) Určíme součinitel přestupu tepla. [10]

3.4 Prostup tepla

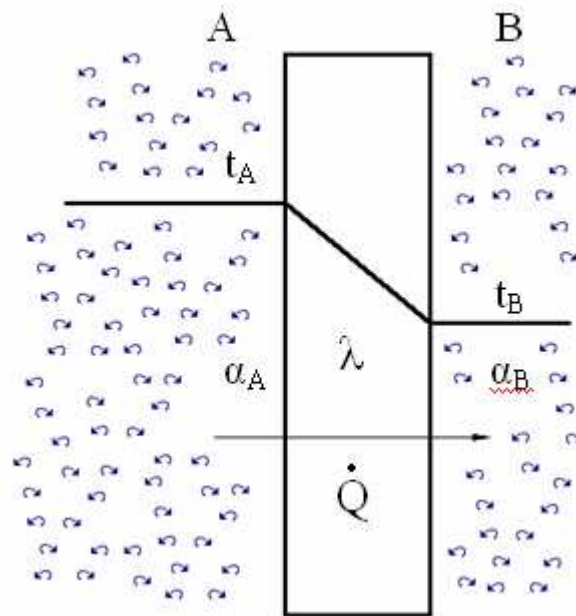
Prostup tepla je sdílení tepla mezi dvěma tekutinami přes pevnou přepážku (tekutiny se vzájemně nemísí)

$$\text{Deska :} \quad \dot{Q} = k \cdot (t_A - t_B) \cdot A \quad (58)$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_A} + \sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_B} \quad (59)$$

$$\text{Válec :} \quad \dot{Q} = k_L \cdot (t_A - t_B) \cdot L \quad (60)$$

$$\frac{\pi}{k_L} = \frac{1}{\alpha_A \cdot d_A} + \sum_{j=1}^n \frac{\ln \frac{d_{j+1}}{d_j}}{2\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_B \cdot d_B} \quad (61)$$



Obr. 19 Prostup tepla

[10]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE PRO PRAKTICKOU ČÁST

V praktické části této diplomové práce je úkolem zjistit akustickou absorpci (pohltivost) a tepelnou vodivost různých sendvičových struktur s měnící se tloušťkou i materiálem jádra. Dále se výzkum zabývá do jaké míry tloušťka sendvičových struktur vliv na měřené veličiny a také se v práci posuzuje, jaký vliv má rozdělující vrstva prepregu mezi jádry na tyto měřené parametry. Konkrétně jsou cíle pro praktickou část definovány následně:

- Vyhledat a na výrobu sendvičových struktur použít materiály používané v železniční dopravě
- vyrobít sendvičové panely
- vyřezat vzorky o požadovaném tvaru a rozměru pro jednotlivá měření
- provést měření akustické absorpce u jednotlivých struktur
- provést příslušné měření a zjistit součinitele tepelné vodivosti λ .

5 POUŽITÉ PŘÍSTROJE

K naměření požadovaných akustických a tepelných vlastností byly použity tyto přístroje.

5.1 Kundtova trubice

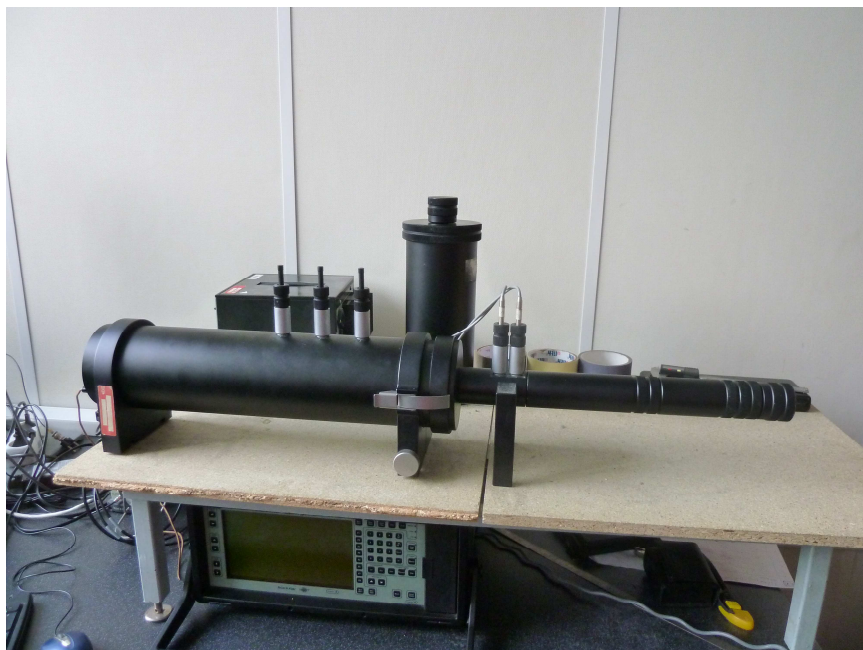
K měření koeficientu zvukové pohltivosti byla použita dvou-mikrofonová impedanční trubice (Obr. 20). Toto zařízení obsahuje dvě nastavné trubice, malou o vnitřním průměru 30 mm, která slouží pro měření nižších frekvencí v rozsahu 20 Hz až 1600 Hz a velkou o vnitřním průměru 100 mm, která slouží pro měření vyšších frekvencí v rozsahu od 500 Hz do 6400 Hz. Celkový rozsah tohoto zařízení je tedy od 20 Hz do 6400 Hz.

Trubice byla připojena ke zdroji zvuku, který snímaly dva mikrofony. Obě nastavné trubice obsahovaly akusticky tvrdou desku, která byla nastavitelná pomocí pístu se stupnicí. Tento píst se stupnicí umožňoval nastavení akusticky tvrdé desky v přesně požadované vzdálenosti od zkušebních vzorků.

Princip měření je takový, že koeficient zvukové pohltivosti je bezrozměrné číslo nabývající hodnot od 0 do 1 a je dáno poměrem intenzity zvuku, kterou těleso pohltí na určité ploše k intenzitě, která na danou plochu dopadá. Materiál, který na dané ploše pohltí zvuk úplně, má hodnotu pohltivosti 1.

$$\alpha = \frac{I_2}{I_1}, \quad (62)$$

kde α je koeficient zvukové pohltivosti, I_1 je intenzita zvuku dopadající na povrch a I_2 je intenzita zvuku pohlceného povrchem.



Obr. 20 Kundtova trubice

5.2 Zařízení pro měření podle Fitce

K měření tepelné vodivosti nestacionární metodou bylo použito zařízení zkonstruované podle Fitche. Toto zařízení je zobrazeno na obr. 21, konkrétně se toto zařízení používá především k měření tepelné vodivosti desek z plastů, pryží nebo usňových materiálů.



Obr. 21 Příklad podle Fitche



Obr. 22 Uložení vzorku při měření

Samotný Princip měření je založen na tom, že měřený vzorek je vložen mezi mosazný válec, který je temperován na 45°C a mosazný měřicí válec, na který je připojen termočlánek. Při vytemperování vzorku na teplotu 45°C se mosazný válec s teplotou 45°C vymění za válec s teplotou 25°C, současně se zapne snímání teploty pomocí upraveného modulu Control Web 2000 na osobním počítači, který převádí data převodním systémem ADAM 5 přes komunikační port do osobního počítače. Měřená teplota postupně klesá až k ustálené teplotě 25°C. následně se spustí vyhodnocení tohoto souboru pomocí programu NeReg02 na osobním počítači. Další součásti měřicího zařízení jsou také termostaty udržující teploty 45°C a 25°C, izolační kryt měřicího válce, závaží a stabilizovaný stejnosměrný zdroj.

5.3 Další použité přístroje

Pro úpravu vyrobených sendvičových panelů, přípravu vzorků, záznam měření a další práci byly použity následující stroje, přístroje a zařízení:

Přímočará pásová pila – na rozřezání materiálů na menší části

CNC frézka – pro vytvoření kulatých vzorků o průměru 100, 50 a 30 mm

Digitální posuvné měřidlo a digitální mikrometr

Digitální fotoaparát – Panasonic DMC – TZ8

Software LabShop Pulse – pro zpracování dat naměřených na Kundtově trubici

6 POUŽITÉ MATERIÁLY

Vzorky použité při zkouškách jsou vždy sendvičové struktury se shodnými vnějšími vrstvami z prepreg materiálu (materiál PHG840-300-42), které se dále dělí do tří skupin podle druhu jádra. Zmíněný prepreg je složený ze skelné tkaniny o plošné hmotnosti 300g/m^2 impregnovaný ze 42% fenologickou pryskyřicí. Tento typ prepregu je používán právě v železniční dopravě a to z důvodu jeho excelentních ohnivzdorných vlastností, ceny a rychlosti vytvrzování. Připravené vzorky sendvičových panelů jsou vyráběny technologií vytvrzování ve vytvrzovací peci (vakuum bagging). Vytvrzování proběhlo při teplotě $T = 130^\circ\text{C}$ po dobu $t = 180$ min. při podtlaku $-p = 80$ kPa. Náběh na teplotu 130°C probíhal jednu hodinu.

6.1 První série vzorků - Hliníková voština

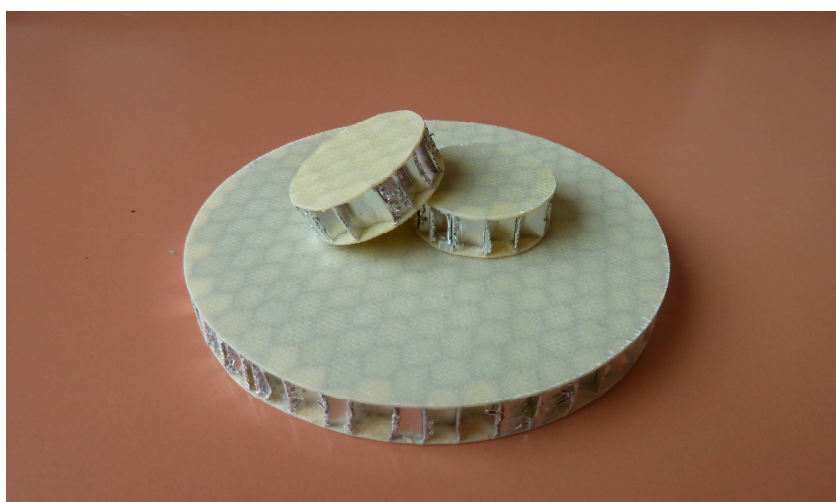
Materiál voštin se vyskytuje pod obchodním názvem Alu-Alloy 3003

Velikost buněk voštiny je rovna 6,4 mm, tloušťka plechu je $80\ \mu\text{m}$ a hustota je $82\ \text{kg/m}^3$.

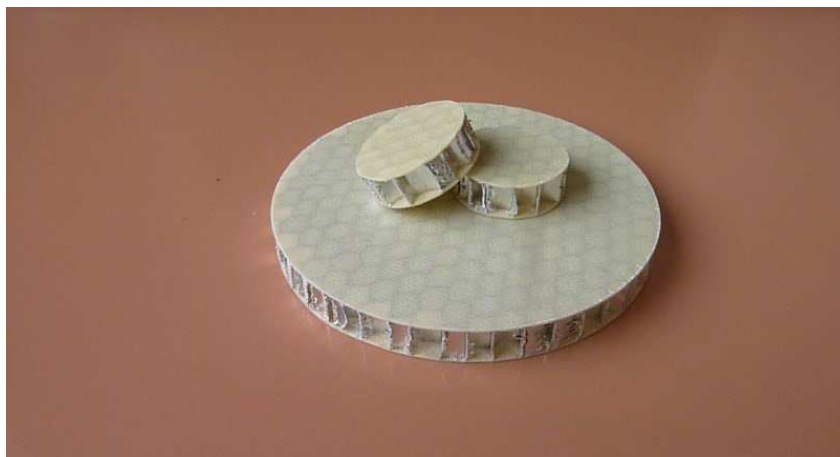
Uvedená pracovní teplota je od -55°C do 177°C

Vzorky s hliníkovou voštinou jsem měl k dispozici v pěti tloušťkách dané voštiny 3, 7, 9, 16 a 20 mm.

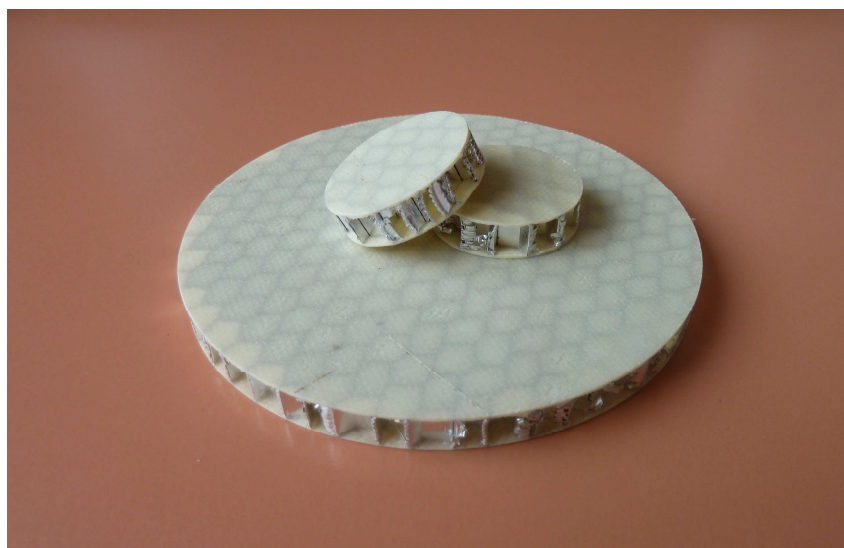
Značení daných vzorků: Al 3 toto označení znamená, že daný vzorek má jádro z hliníkové voštiny o tloušťce 3 mm.



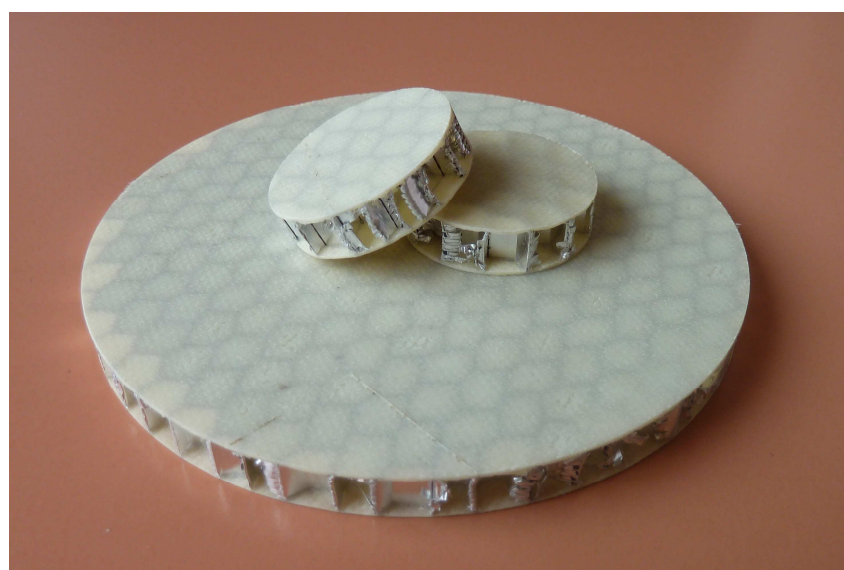
Obr. 23 Vzorek Al 20



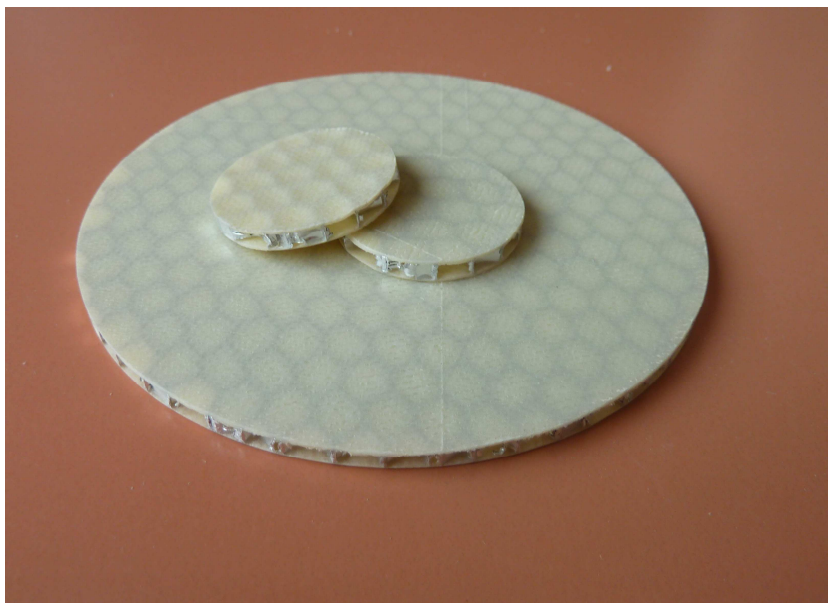
Obr. 24 Vzorek Al 16



Obr. 25 Vzorek Al 9



Obr. 26 Vzorek Al 7



Obr. 27 Vzorek Al 3

6.2 Druhá série vzorků - Polypropylenová voština

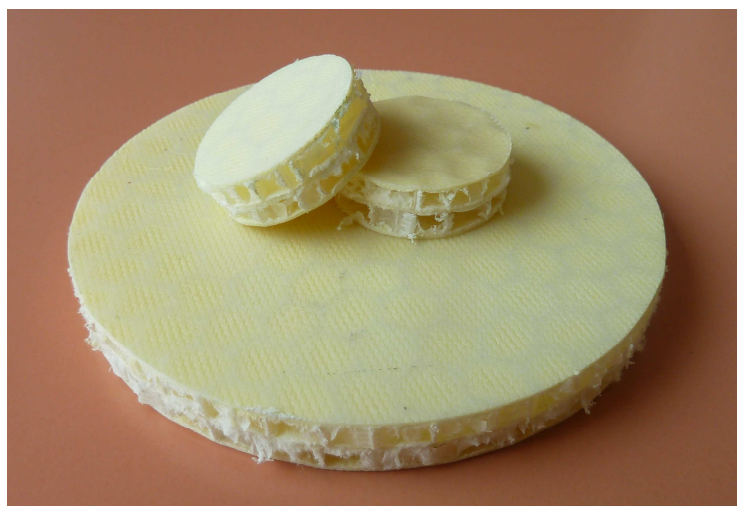
Velikost buněk u vzorků s polypropylenovou voštinou je 8 mm, hustota polypropylenové voštiny je 65 kg/m^3 . Vlastnosti polypropylenové voštiny jsou například dobrá odolnost vůči vodě a většině kyselin, alkáliím a roztokům solí, v případě ohnivzdornosti lze dosáhnout třídy M1/F0 u zhotovených sendvičových panelů, záleží na složení vnějších vrstev. Vzorky s polypropylenovou voštinou byly k dispozici ve třech tloušťkách, ze kterých byly vyrobeny následující vzorky s tloušťkou voštiny 5 mm, vzorek s tloušťkou voštiny 10 mm a vzorek složený ze dvou vrstev voštiny o tloušťce 5 mm, mezi kterými byla jedna vrstva prepregu. Značení daných vzorků: PP 5/5 toto označení znamená, že daný vzorek má jádro ze dvou polypropylenových voštin o tloušťce 5 mm.



Obr. 28 Vzorek PP 5



Obr. 29 Vzorek PP 10



Obr. 30 Vzorek PP 5/5

6.3 Třetí série vzorků - Korkové jádro

Vzorky s korkovým jádrem, které byly použity, mají obchodní značení Corecork NL 10 respektive NL 20. Hustota NL10 je 120 kg/m^3 , hustota NL 20 je 200 kg/m^3 a jeho maximální teplota zpracování je 150°C .

Vzorky s korkovým jádrem byly použity ve třech modifikacích, vzorek s jádrem o třech vrstvách korkového plátu o tloušťce 3 mm, oddělené vždy jednou vrstvou prepregu. Vzorek s jádrem s dvěma vrstvami korkového plátu o tloušťce 3 a 6 mm, oddělené jednou vrstvou prepregu. Vzorek s jádrem z jednoho korkového plátu o tloušťce 9 mm.

Tyto tři druhy modifikací byly k dispozici jak s materiálem NL 10 tak i s materiálem NL 20.

Značení daných vzorků: NL 20 3/3/3 toto označení znamená, že daný vzorek má jádro ze tří korkových plátů o tloušťce 3 mm a materiálu NL 20.



Obr. 31 Vzorek NL 10 3/3/3



Obr. 32 Vzorek NL 10 3/6



Obr. 33 Vzorek NL 10 9



Obr. 34 Vzorek NL 20 3/3/3



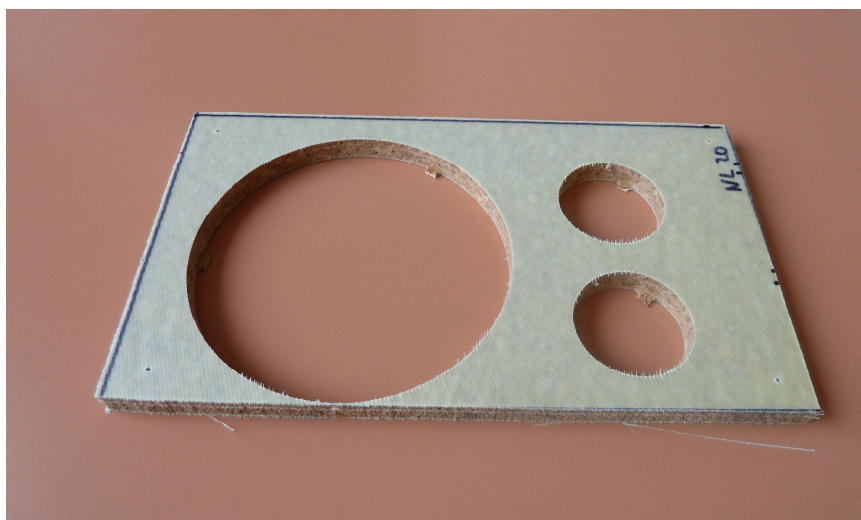
Obr. 35 Vzorek NL 20 6/3



Obr. 36 Vzorek NL 20 9

6.4 Úprava vzorků

Veškeré materiály, které jsem měl k dispozici, jsem dostal v podobě obdélníkových desek. Veškeré vyrobené sendvičové panely byly ve formě desek o rozměrech 500 x 1200 mm, ze kterých byly následně vyřezány na pásové pile vzorky o rozměrech 120 x 150 mm. Tyto vzorky byly upnuty na CNC frézce a pomocí připraveného programu byly do nich vyfrézovány vzorky kruhového tvaru o průměrech 30, 50 a 100 mm pro jednotlivé zkoušky. Vzorky o průměru 30 a 100 mm byly použity na měření v Kundtově trubici a vzorky o průměru 50 mm byly použity k měření na zařízení podle Fitche. Na Obr. 37 je zobrazena vyřezaná deska NL 20 6/3 s již odfrézovanými příslušnými vzorky.



Obr. 37 Příklad odfrézované desky

Vzorky s průměrem 50 mm, určené k měření na zařízení podle Fitche, byly z důvodu snížení tepelných ztrát při zkouškách, obaleny 10 mm tlustým izolačním materiálem pod obchodním názvem HT/Armaflex, který je zobrazen na Obr. 38.



Obr. 38 Odizolování vzorků

7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

7.1 Koeficient zvukové pohltivosti

7.1.1 Značení daných vzorků a dat

V následujících grafech je zobrazen koeficient zvukové pohltivosti. Při popisování vzorků byla použita tato značení daných sendvičových struktur.

Tab. 4 Značení vzorků v grafech

| Symbol | Vysvětlivka |
|------------------------|--|
| AL | Sendvičová struktura s hliníkovou voštinou |
| NL 10 | Sendvičová struktura s korkovým jádrem typu NL 10 |
| NL 20 | Sendvičová struktura s korkovým jádrem typu NL 20 |
| PP | Sendvičová struktura s polypropylenovou voštinou |
| H | Označení měření z hrubé (nepohledové) strany struktury |
| P | Označení měření z hladké (pohledové) strany struktury |
| Čísla 3,6,7,9,16,20 | Tloušťka jednotlivých jádrových materiálů v mm |

Vybrané příklady označení materiálů:

AL 9 H – toto označení určuje, že daný vzorek má jako jádro použitou hliníkovou voštinu s tloušťkou 9 mm a při měření byla ke zdroji hluku natočena strana s hrubým povrhem.

PP 5/5 P – toto označení nám určuje, že daný vzorek má jako jádro použité dvě polypropylenové voštiny s tloušťkou 5 mm oddělené jednou vrstvou prepregu a při měření byla k zdroji hluku natočena pohledová strana s hladkým povrhem.

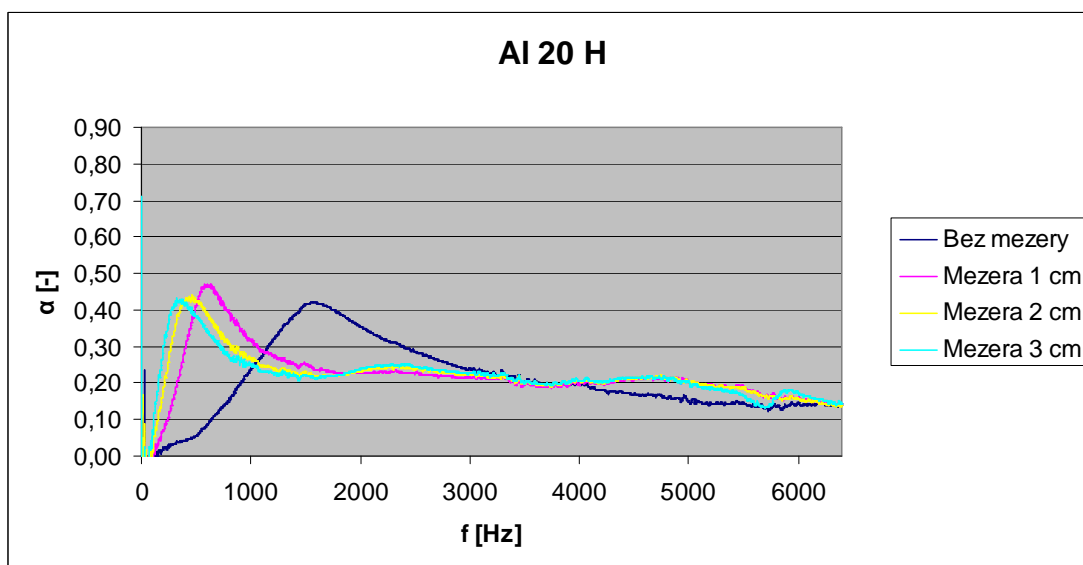
NL10 3/3/3 - toto označení nám určuje, že daný vzorek má jako jádro použité tři korkové pláty z materiálu NL 10 s tloušťkou 3 mm oddělené vždy jednou vrstvou prepregu.

Grafy v závislosti koeficientu zvukové pohltivosti α [-] na frekvenci f [Hz] byly zhotoveny ve dvou provedeních. První provedení je lineární, kde z dat naměřených v laboratořích byl zhotoven graf se stupnicí lineární a hodnoty jsou v těchto grafech zobrazeny stejně jako při

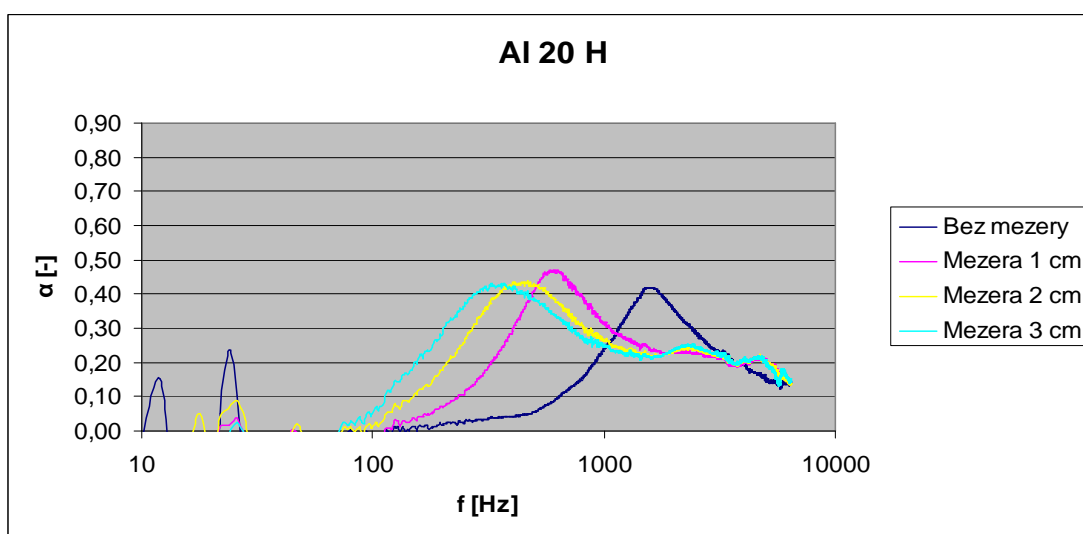
měření, kdy byl použit taktéž mód lineární. Na těchto grafech je vidět celý rozsah frekvencí. Druhé provedení má změněnou stupnici frekvencí z lineární na logaritmickou, ta klade důraz na frekvence v rozsahu od 10 Hz do 1 kHz.

7.1.2 Koeficient zvukové pohltivosti sendvičové struktury s hliníkovou voštinou

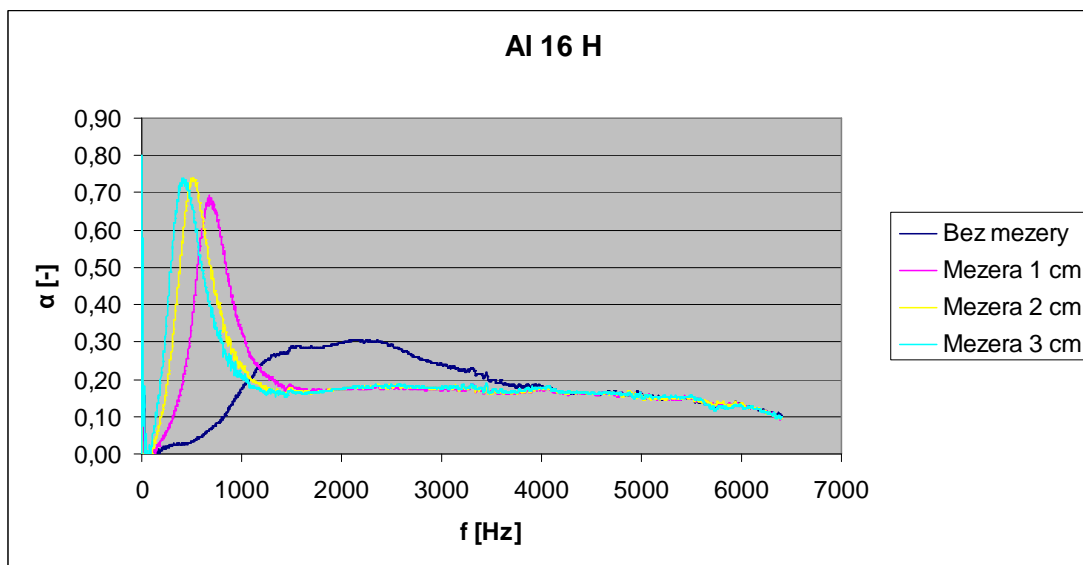
Z následujících obrázků je patrné, že se zvyšující se mezerou mezi vzorkem a pevnou stěnou v Kundtově trubici se maximum pohltivosti posouvá k nižším frekvencím, avšak hodnota maxima klesá. Výjimkou je zkouška pohltivosti bez mezery mezi vzorkem a pevnou stěnou, tam je sice maximum zvukové pohltivosti v nejvyšších frekvencích, avšak hodnota samotného maxima je menší než u zkoušek s mezerami.



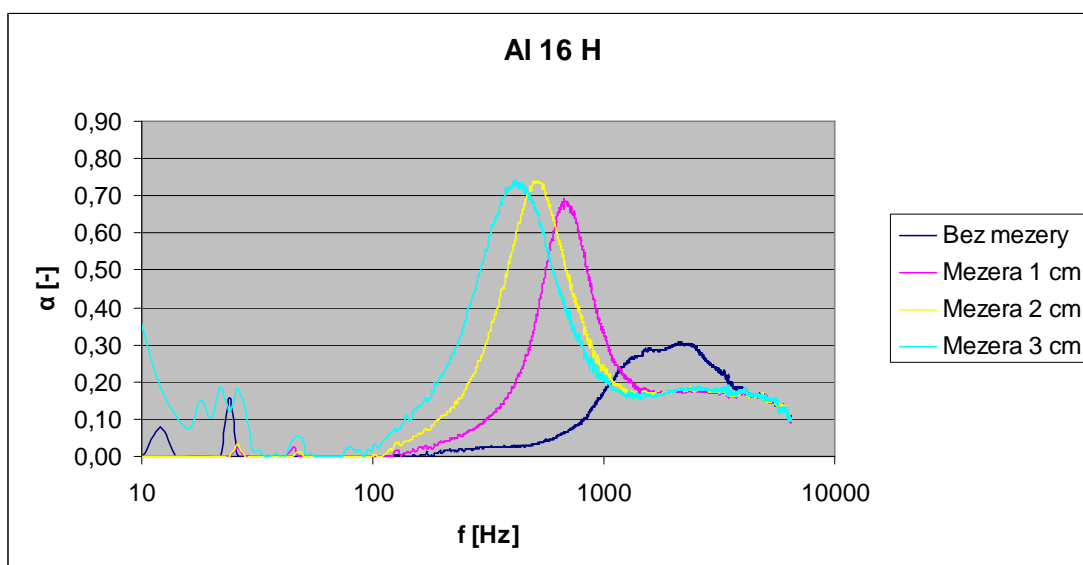
Obr. 39 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 20 H



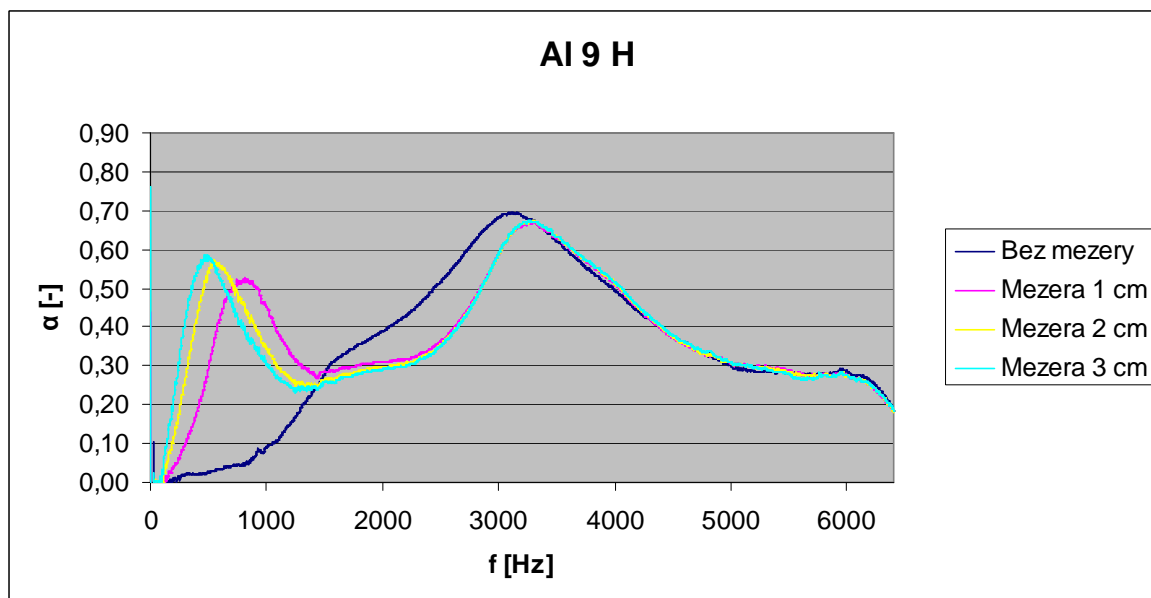
Obr. 40 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 20 H



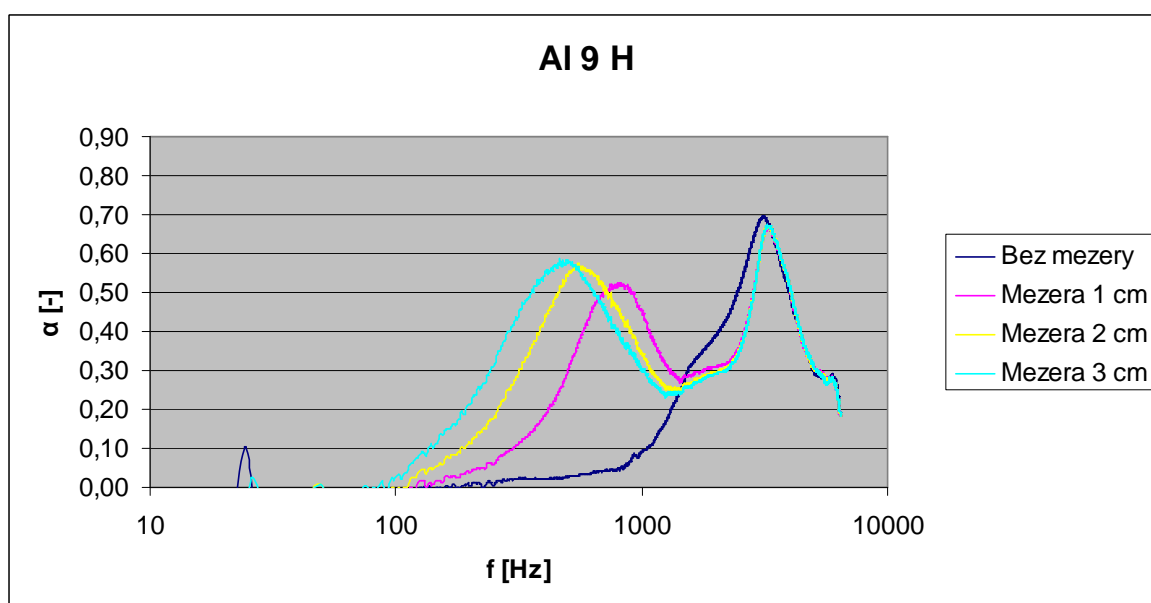
Obr. 41 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 16 H



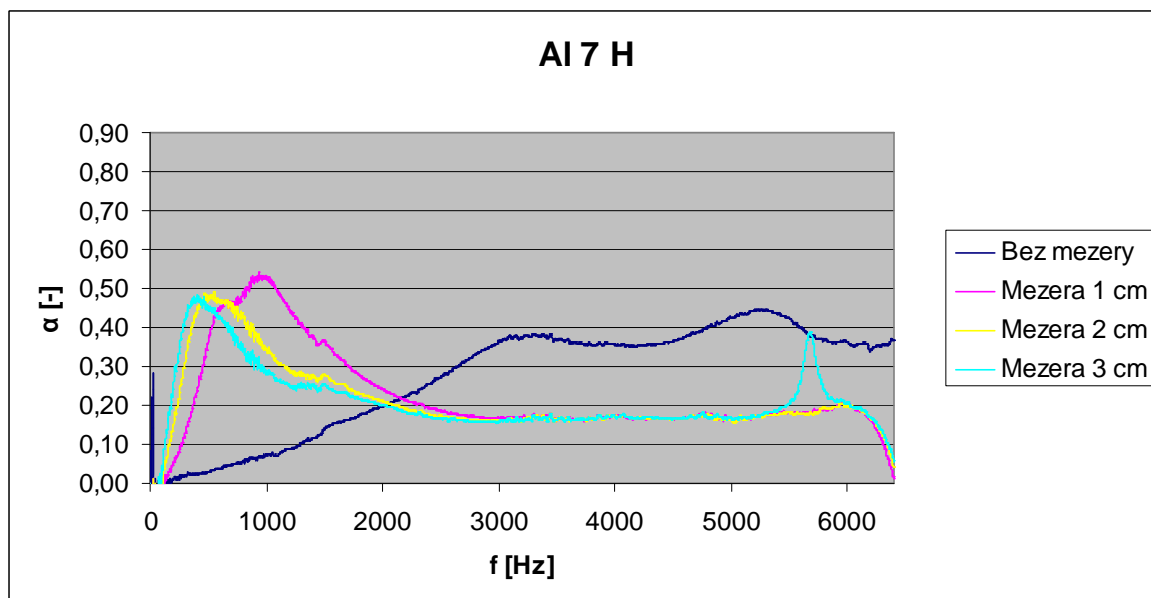
Obr. 42 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 16 H



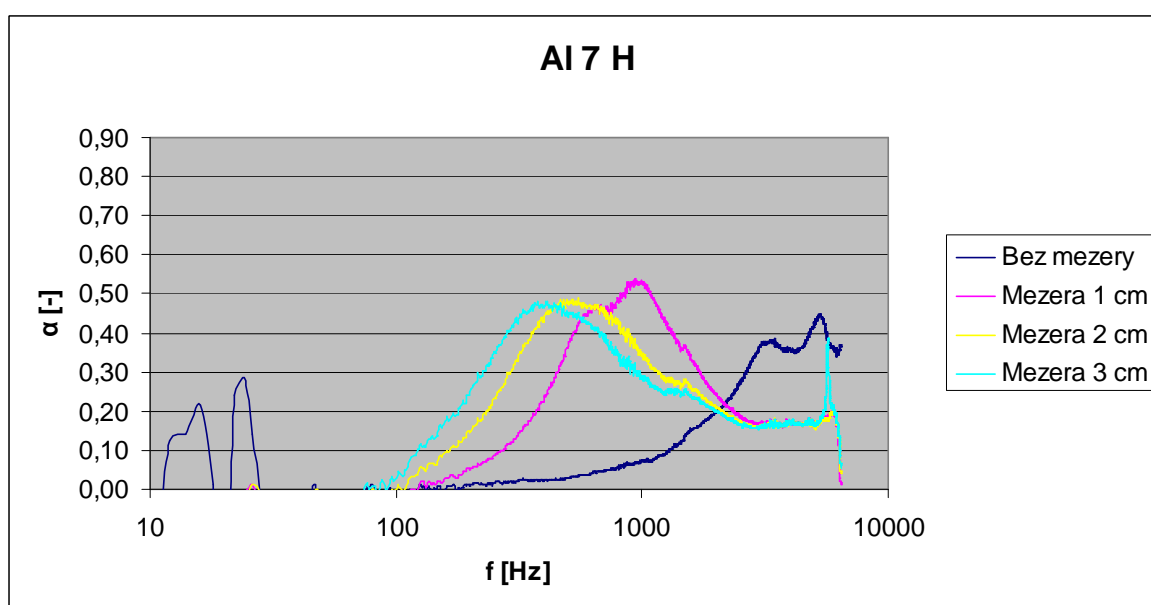
Obr. 43 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 9 H



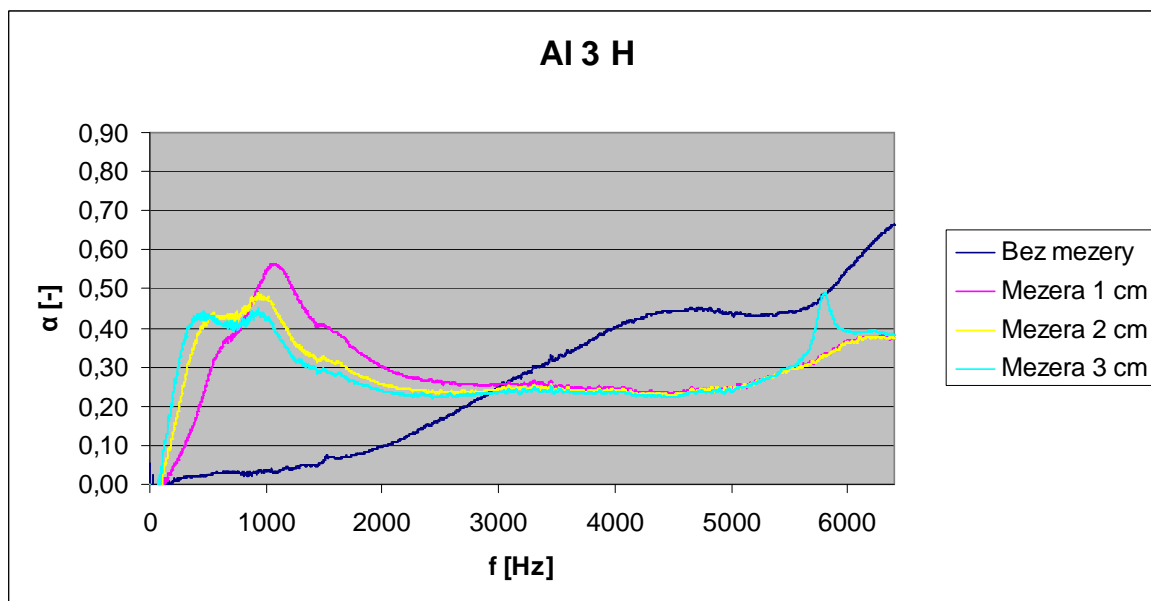
Obr. 44 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 9 H



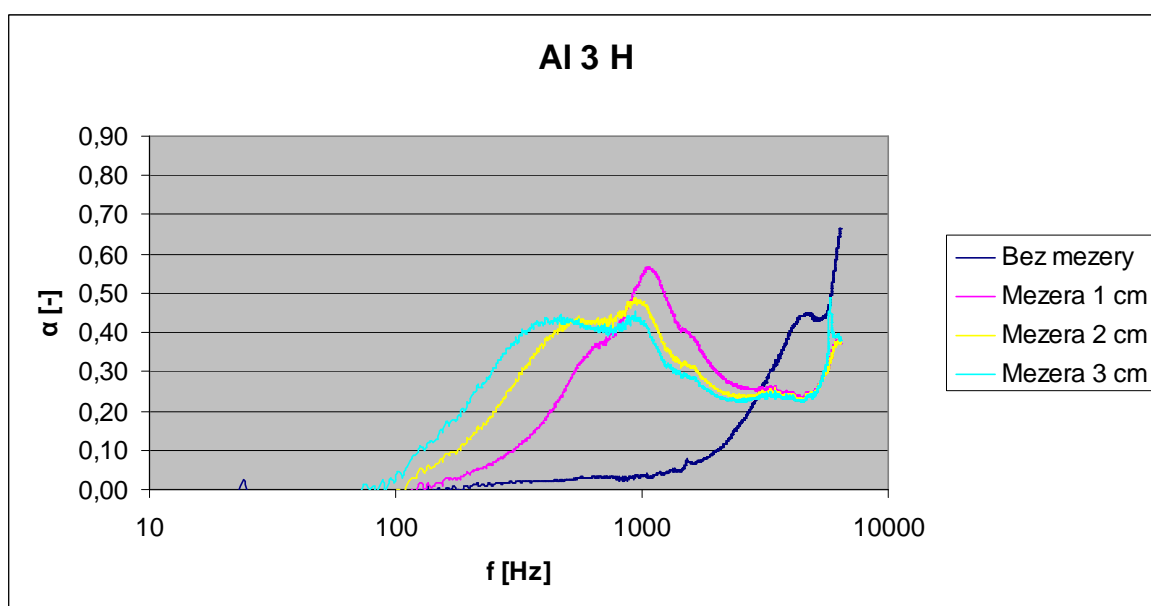
Obr. 45 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 7 H



Obr. 46 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 7 H

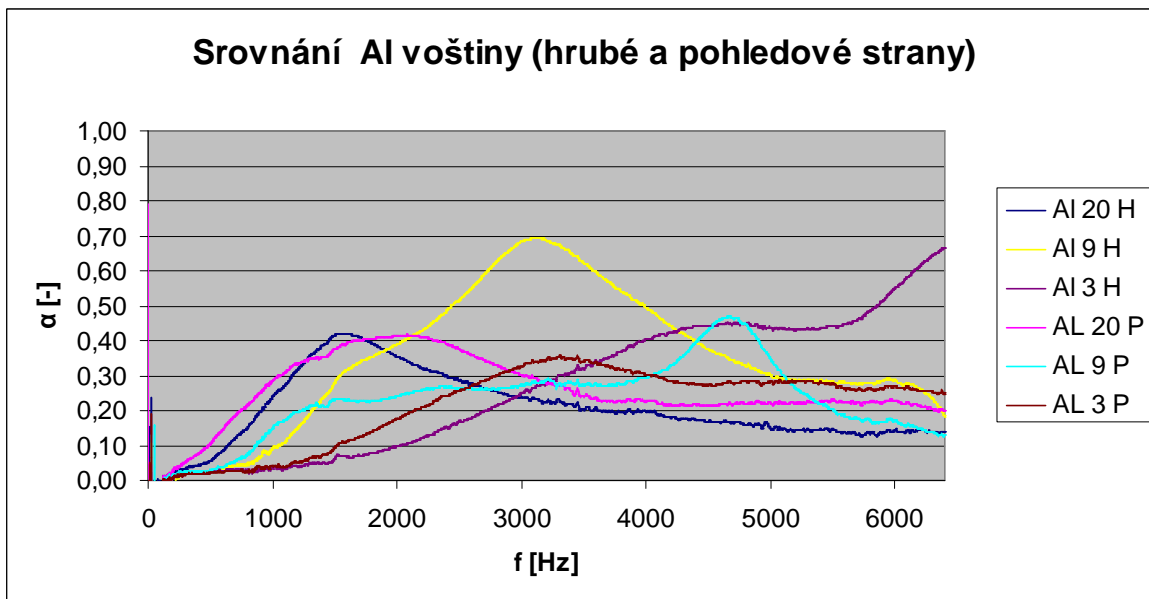


Obr. 47 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 3 H

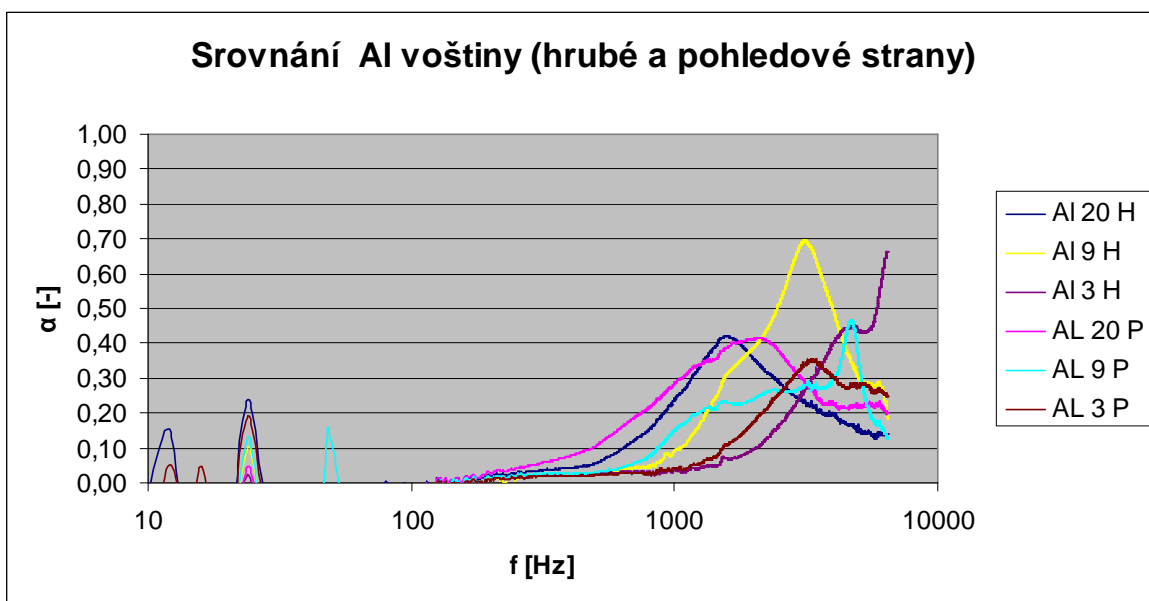


Obr. 48 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 3 H

Porovnání naměřených hodnot u sendvičových struktur s hliníkovou voštinou. Na následujících grafech jsou zobrazeny křivky tří sendvičových struktur měřených jak ze strany s hrubým povrchem tak ze strany pohledové s hladkým povrchem. Z následujícího Obr. 49 a Obr. 50 je patrné, že u zkoušek kdy byl vzorek otočen ke zdroji hluku pohledovou (hladší) stranou, nástupy před maximem jsou prudší a jsou v nižších frekvencích než u vzorků kde byla ke zdroji otočena strana s povrchem hrubým. Také je hodnota maxima u hladší strany nižší než u strany s povrchem hrubým.

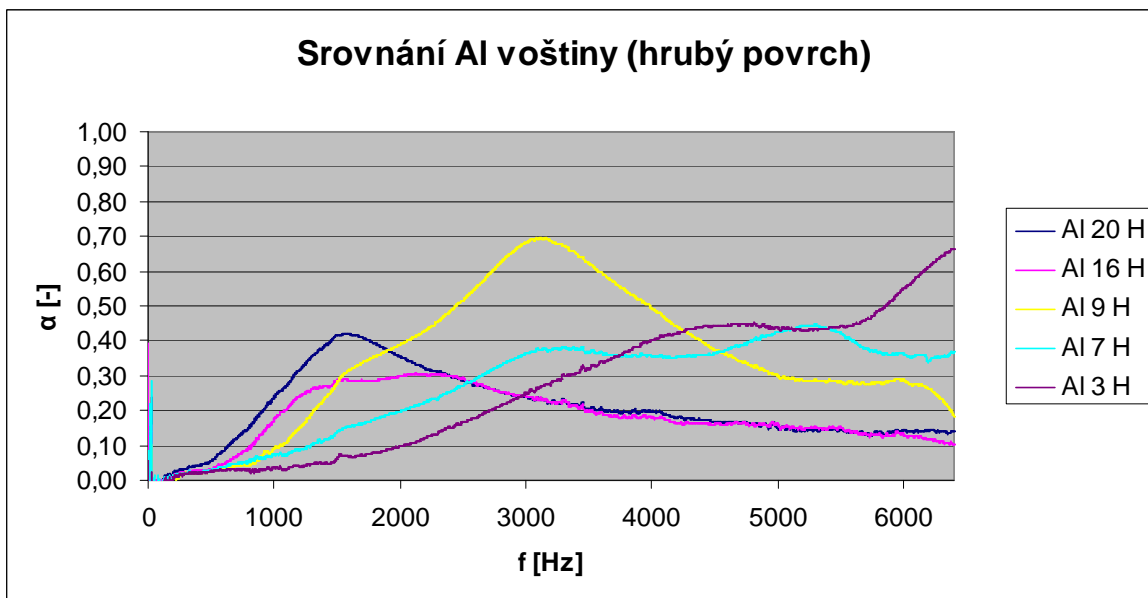


Obr. 49 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání Al voštiny (hrubé a pohledové strany)

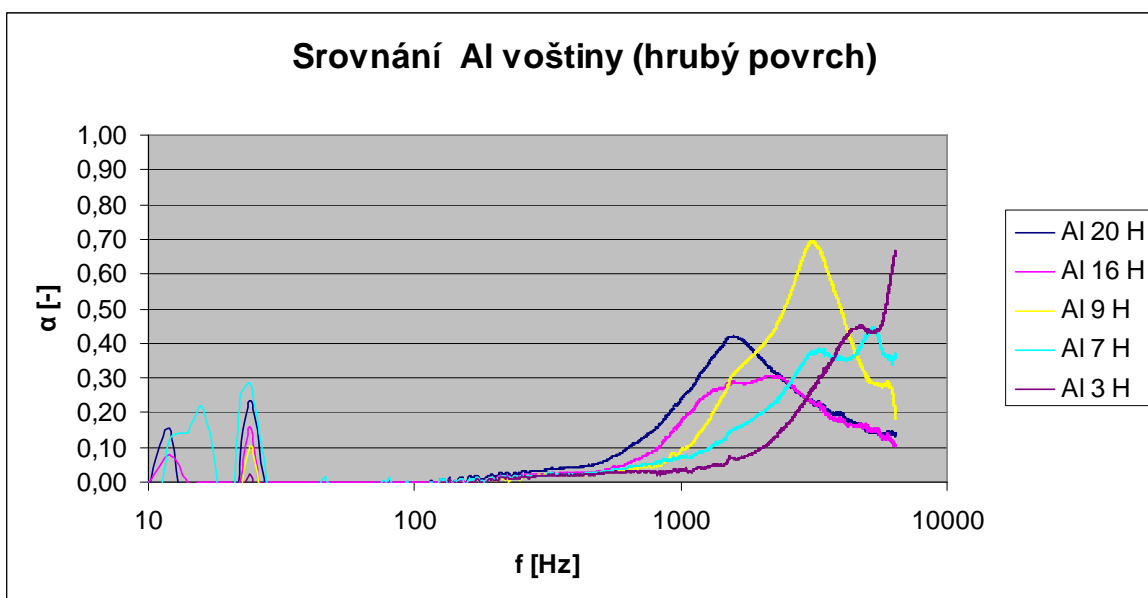


Obr. 50 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání Al voštiny (hrubé a pohledové strany)

Na následujících grafech je zobrazeno srovnání tloušťek sendvičových struktur s hliníkovou voštinou pouze ze strany s hrubým povrchem. Na Obr. 51 a 52 je patrné, že se zvětšující se tloušťkou hliníkové voštiny v sendvičové struktuře se maximum pohltivosti přesouvá od vysokých frekvencí k frekvencím nízkým.



Obr. 51 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání Al voštiny (hrubý povrch)

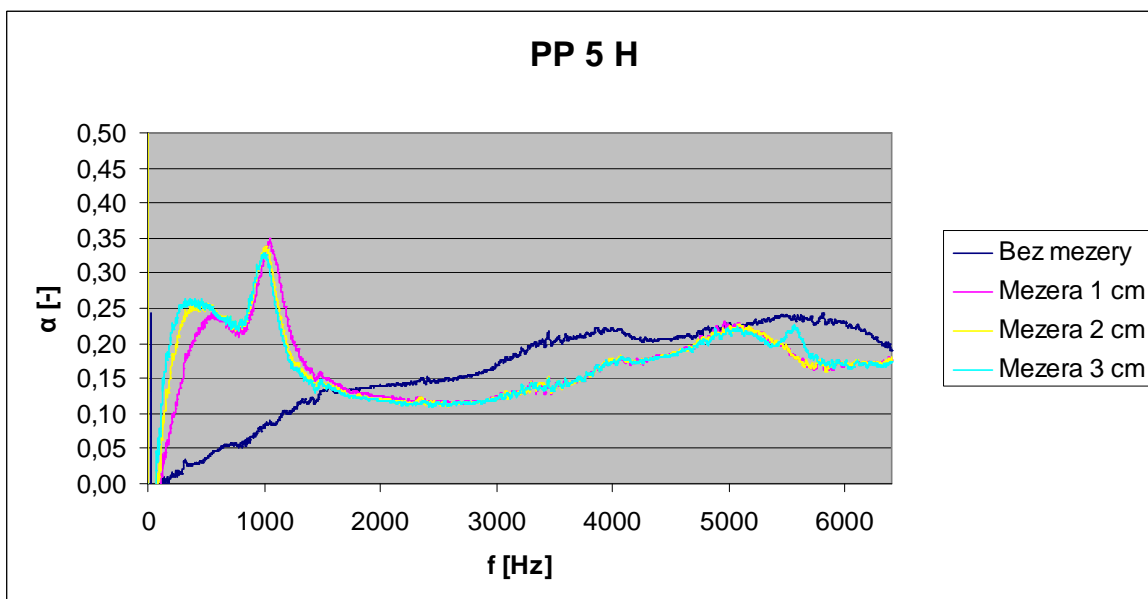


Obr. 52 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání Al voštiny (hrubý povrch)

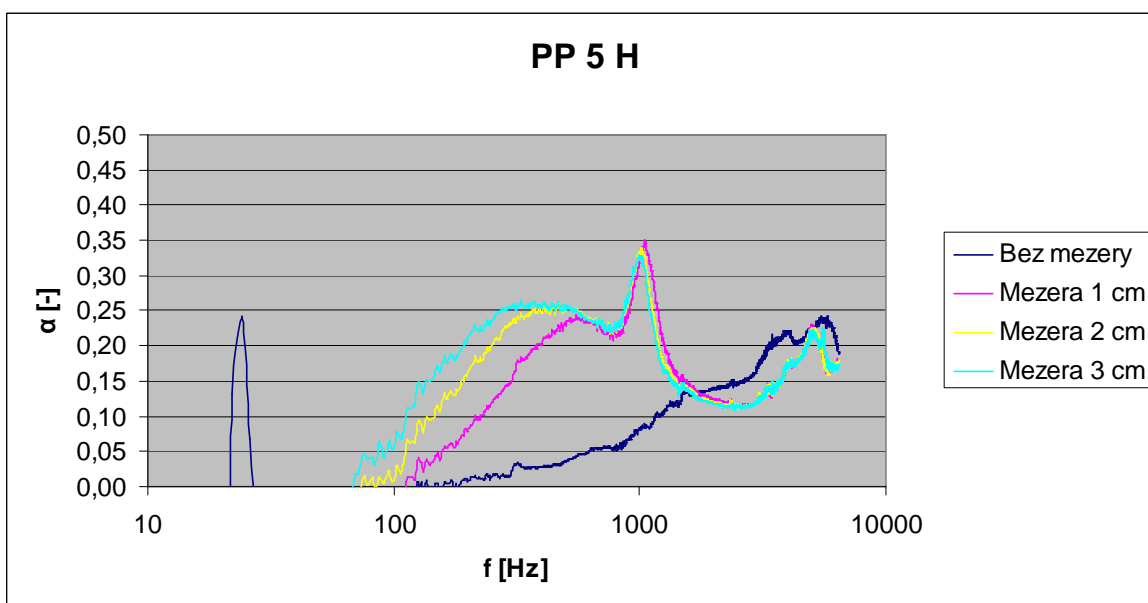
Grafy v této kapitole jsou pouhým výběrem naměřených hodnot, kompletní datové záznamy jsou obsaženy na příloženém CD.

7.1.3 Koeficient zvukové pohltivosti sendvičové struktury s polypropylenovou voštinou

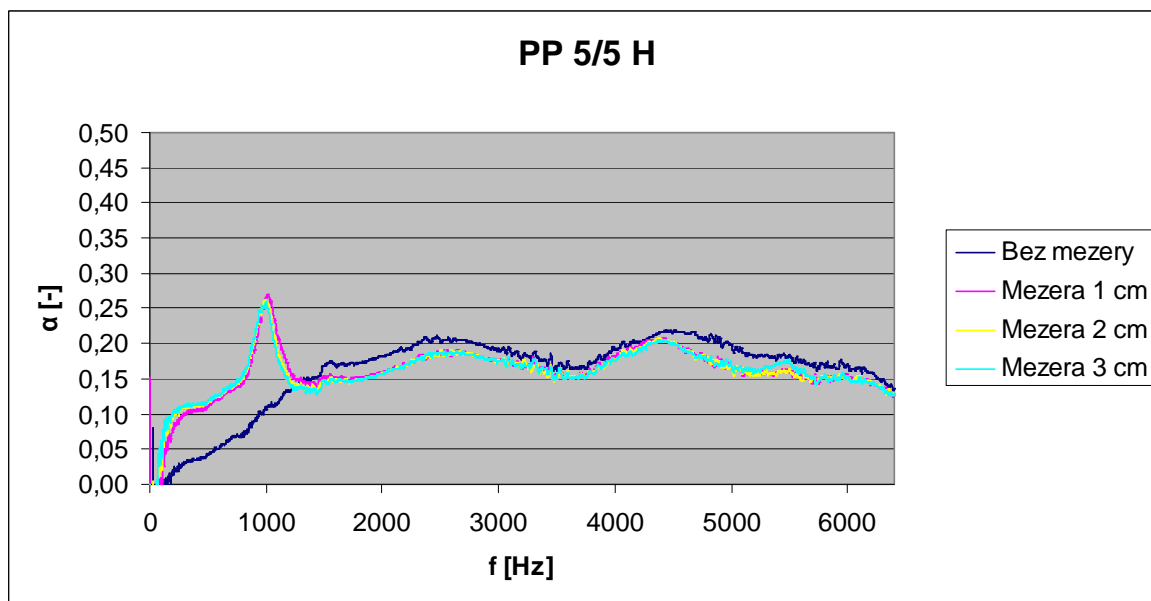
U vzorků s polypropylenovou voštinou je patrné že maxima pohltivosti u zkoušek s mezerou mezi vzorkem a pevnou stěnou v Kundtově trubici jsou vždy do hodnoty 1 kHz, s různou maximální hodnotou podle toho o jaký jde vzorek. Tento materiál je tedy vhodný k použití do aplikací, kde se vyskytuje hluk s frekvencí v rozmezí od 100 Hz do 1 kHz.



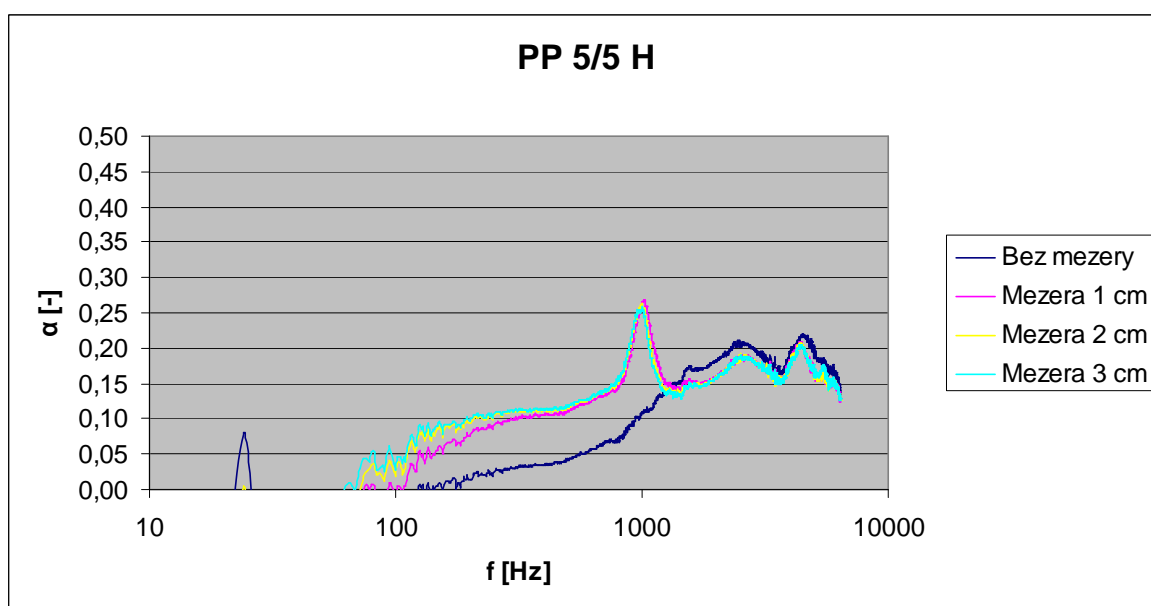
Obr. 53 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti PP 5 H



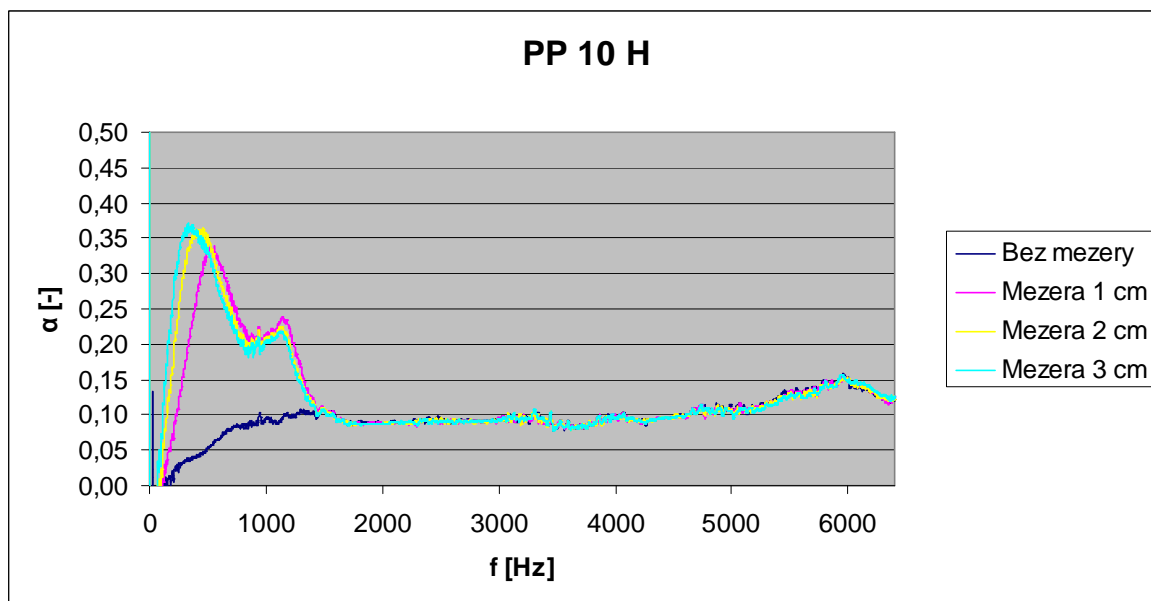
Obr. 54 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti PP 5 H



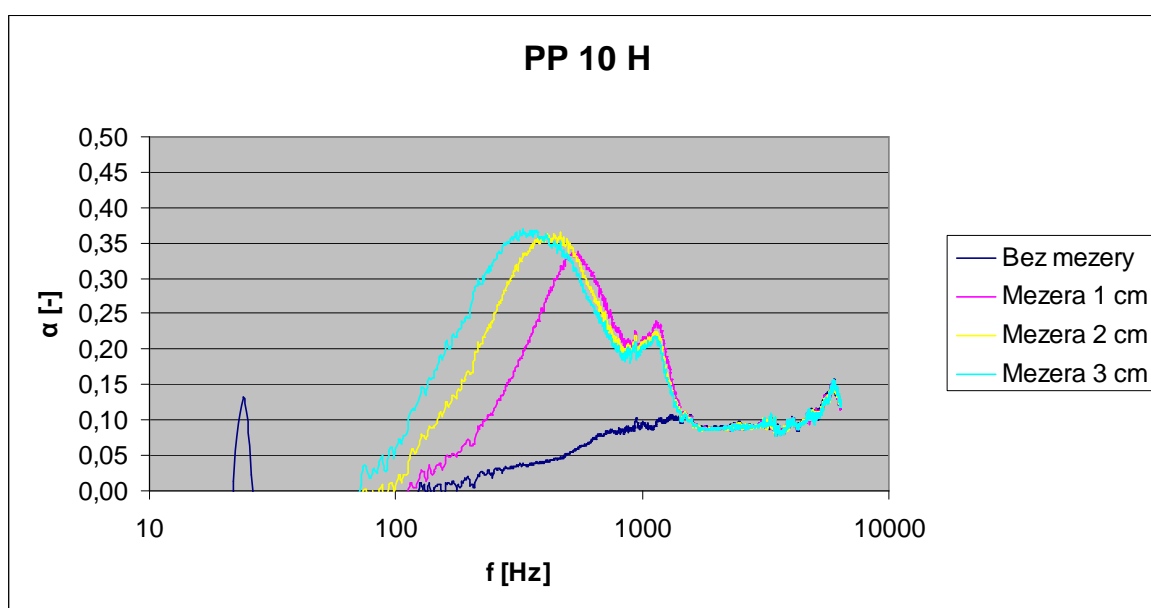
Obr. 55 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti PP 5/5 H



Obr. 56 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti PP 5/5 H

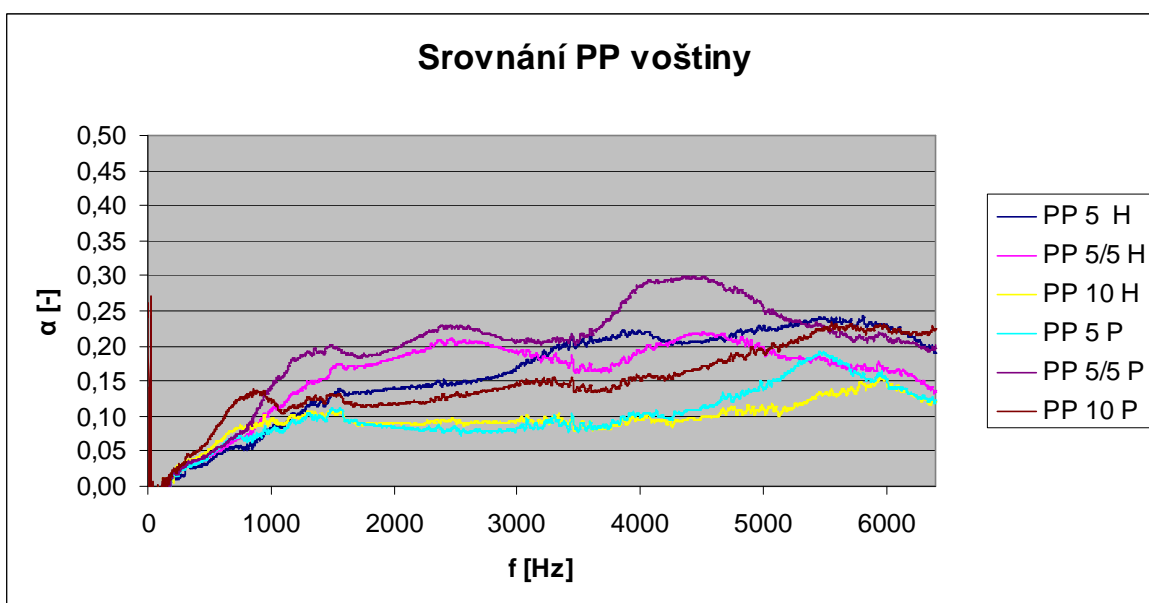


Obr. 57 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti PP 10 H

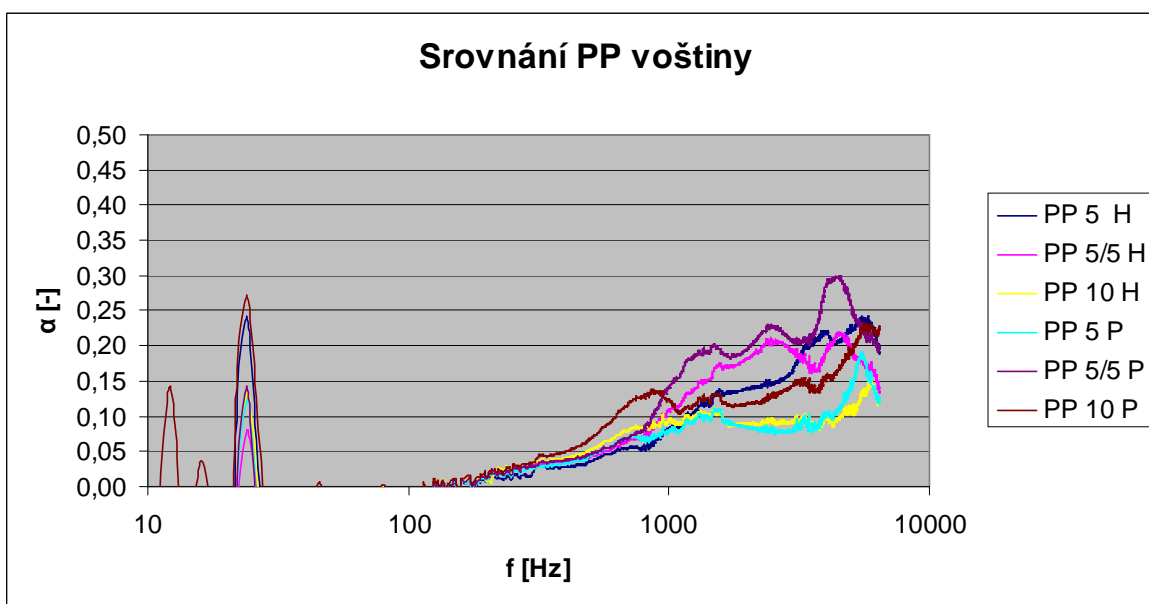


Obr. 58 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti PP 10 H

Porovnání naměřených hodnot u sendvičových struktur s polypropylenovou voštinou. Na následujících grafech jsou zobrazeny křivky tří sendvičových struktur měřených jak ze strany s hrubým povrchem tak ze strany pohledové s hladkým povrchem. Je také zřejmé, že vzorky s polypropylenovou voštinou nemají tak zřejmé maximum pohltivosti v určité frekvenci jako vzorky s voštinou hliníkovou.

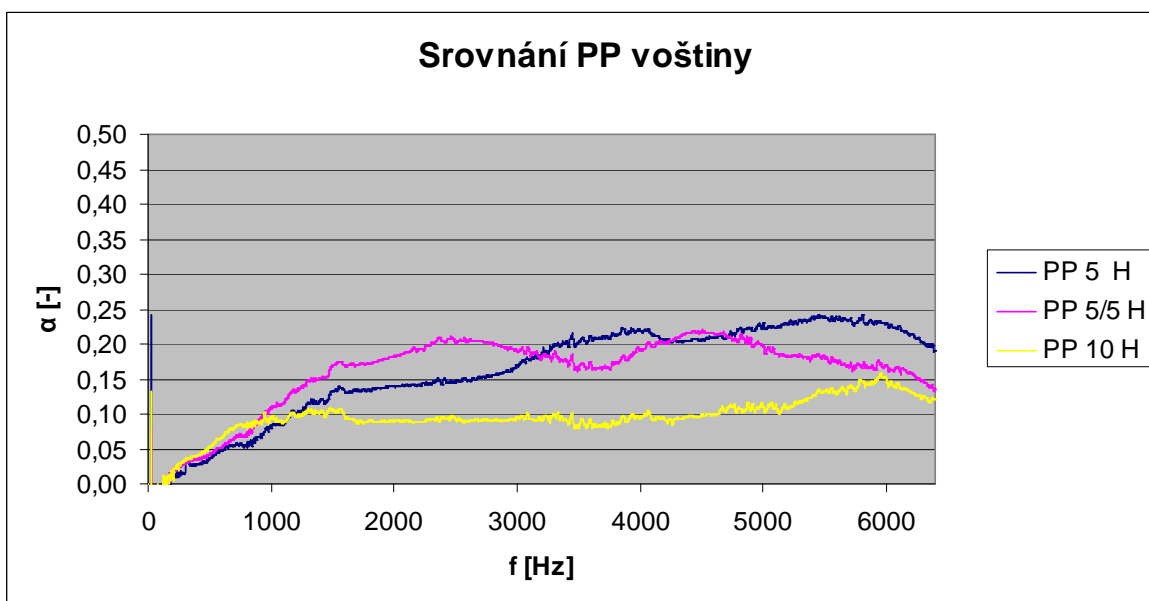


Obr. 59 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání PP voštiny (hrubé a pohledové strany)

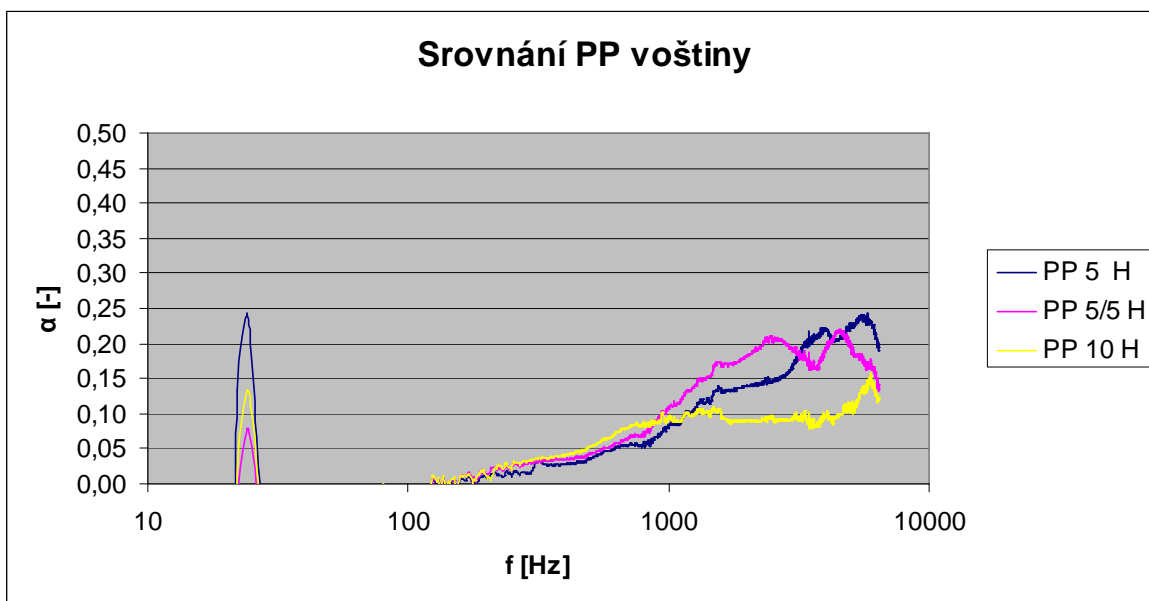


Obr. 60 Logaritmičtý graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání PP voštiny (hrubé a pohledové strany)

Na následujících grafech je zobrazeno srovnání tloušťek sendvičových struktur s polypropylenovou voštinou pouze ze strany s hrubým povrchem.



Obr. 61 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání PP voštiny (hrubý povrch)

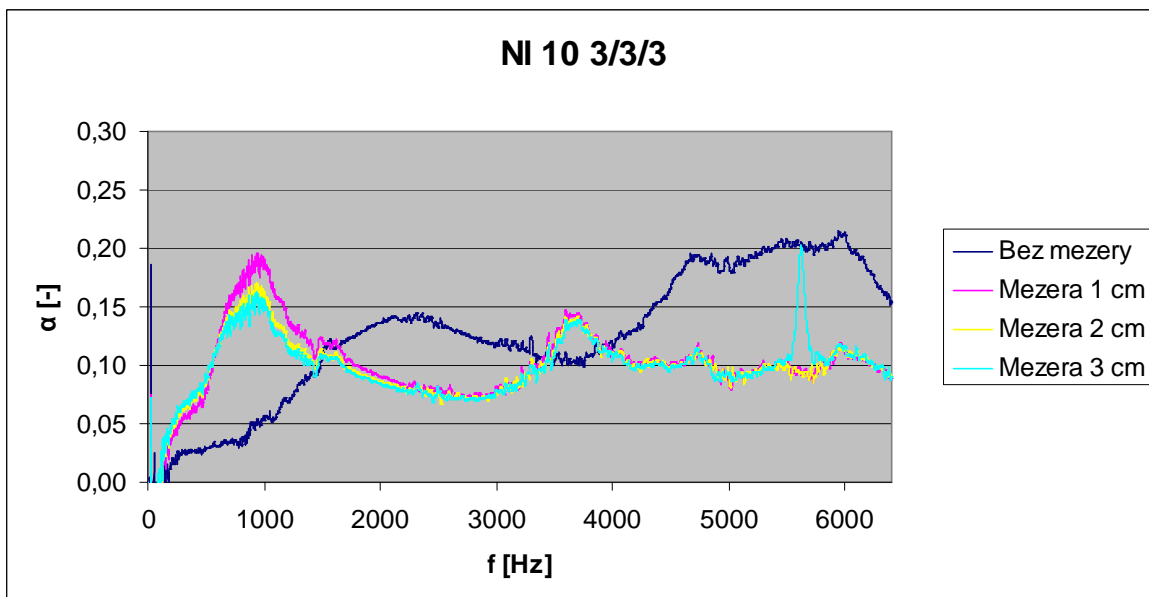


Obr. 62 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání PP voštiny (hrubý povrch)

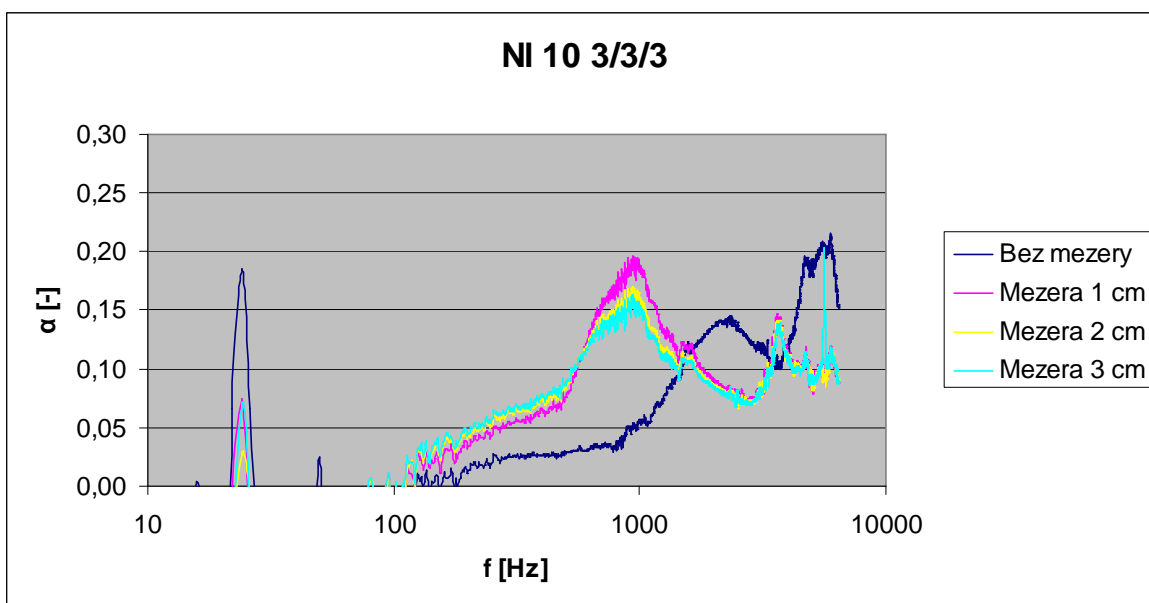
Grafy v této kapitole jsou pouhým výběrem naměřených hodnot, kompletní datové záznamy jsou obsaženy na příloženém CD.

7.1.4 Koeficient zvukové pohltivosti sendvičové struktury s korkovým jádrem

Z Obr. 63 a Obr. 64 je patrné, že maximum pohltivosti u vzorku NL 10 3/3/3 je při měření s mezerami mezi vzorkem a pevnou stěnou přibližně v 1 kHz a se zvětšující se mezerou se hodnota daného maxima snižuje.

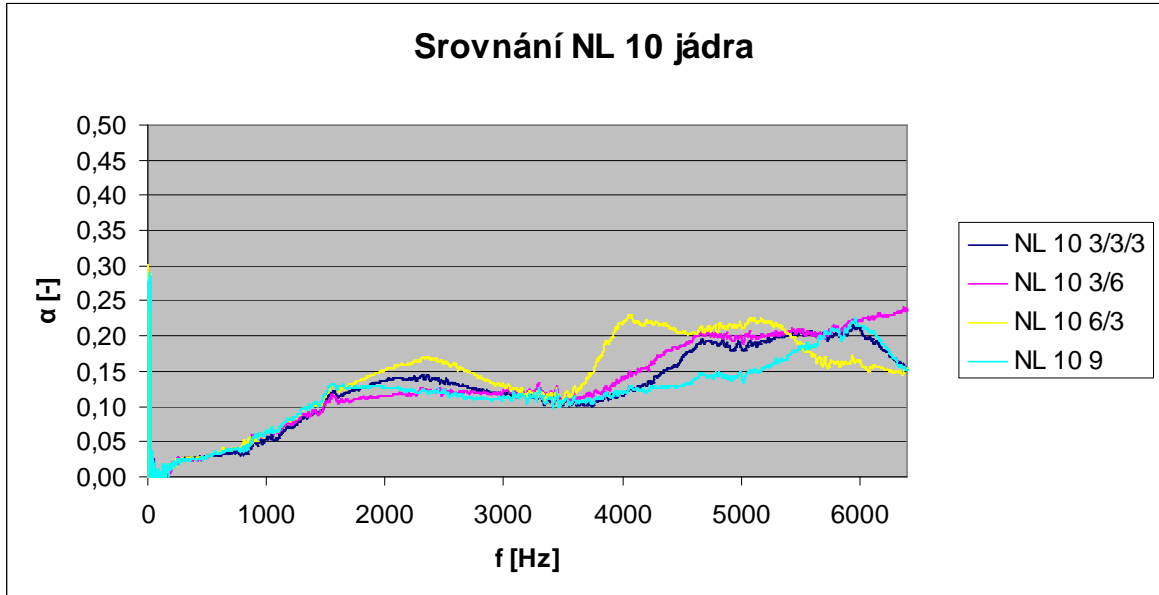


Obr. 63 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti NL 10 3/3/3

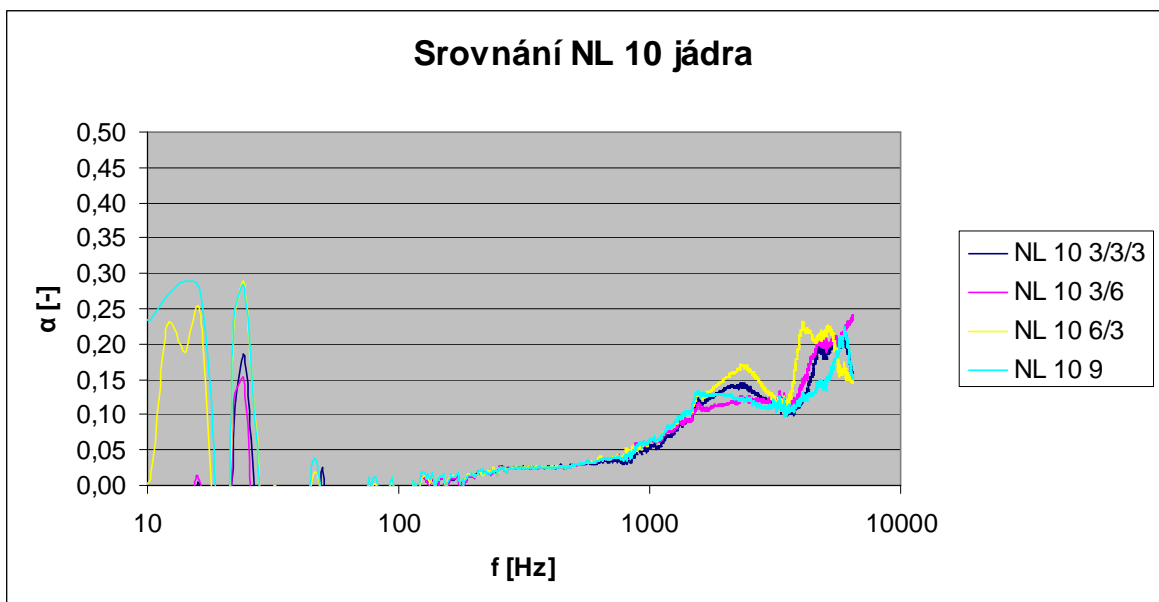


Obr. 64 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti NL 10 3/3/3

Porovnání naměřených hodnot u sendvičových struktur s korkovým jádrem typu NL 10. Na následujících grafech jsou zobrazeny křivky čtyř sendvičových struktur, měřených bez mezery (mezi vzorkem a pevnou stěnou nebyla žádná mezera).

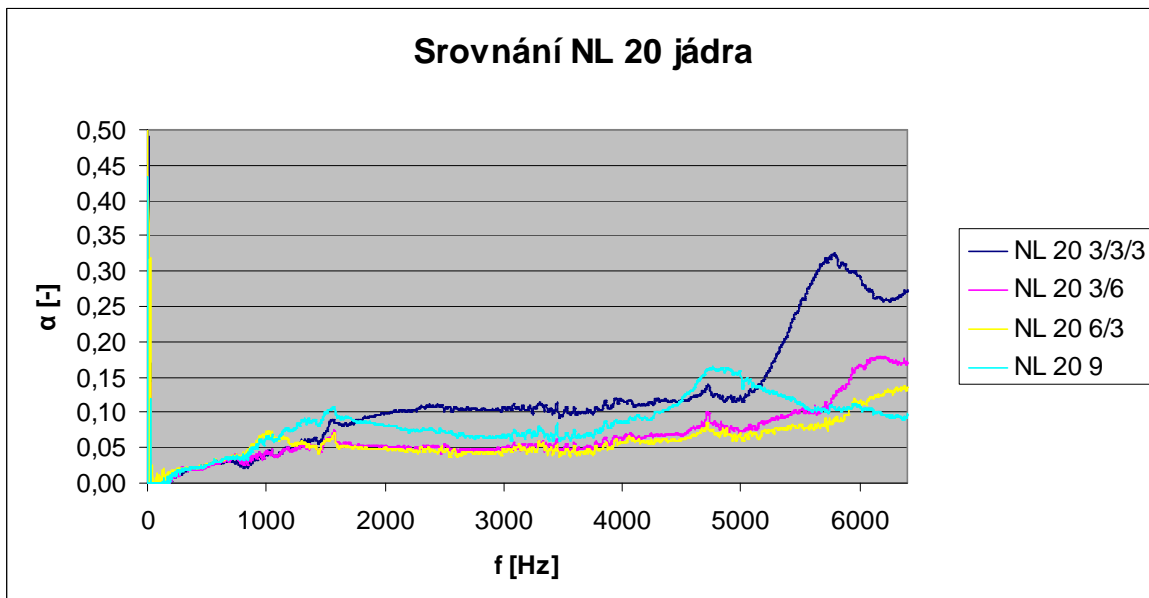


Obr. 65 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání korkového jádra typu NL 10

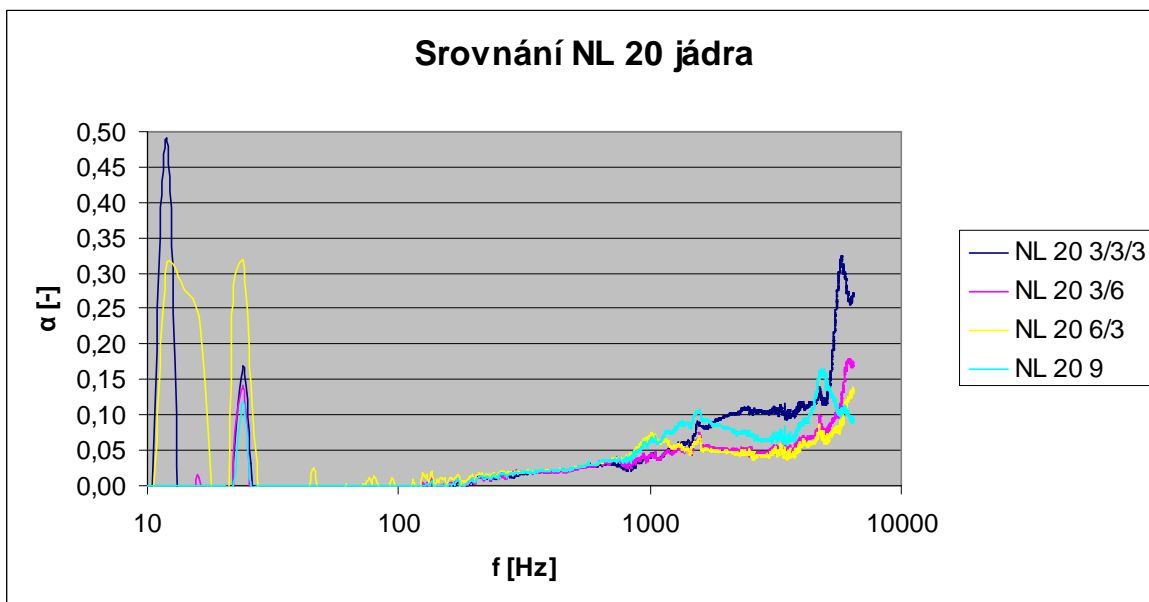


Obr. 66 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání korkového jádra typu NL 10

Porovnání naměřených hodnot u sendvičových struktur s korkovým jádrem typu NL 20. Na následujících grafech jsou zobrazeny křivky čtyř sendvičových struktur, měřených bez mezery (mezi vzorkem a pevnou stěnou nebyla žádná mezera).

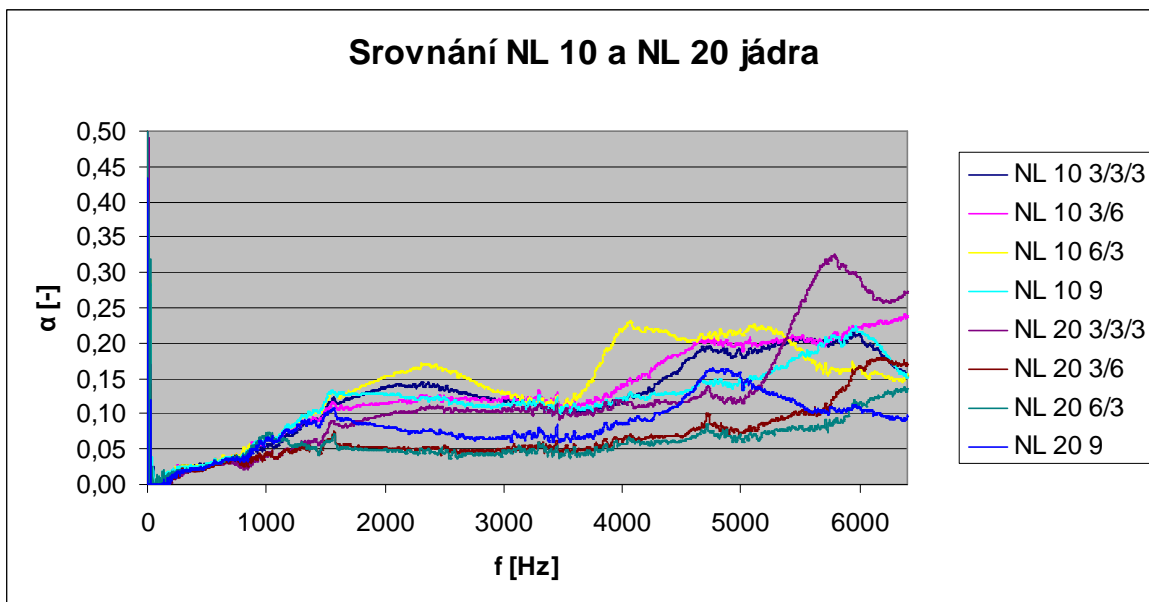


Obr. 67 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání korkového jádra typu NL 20

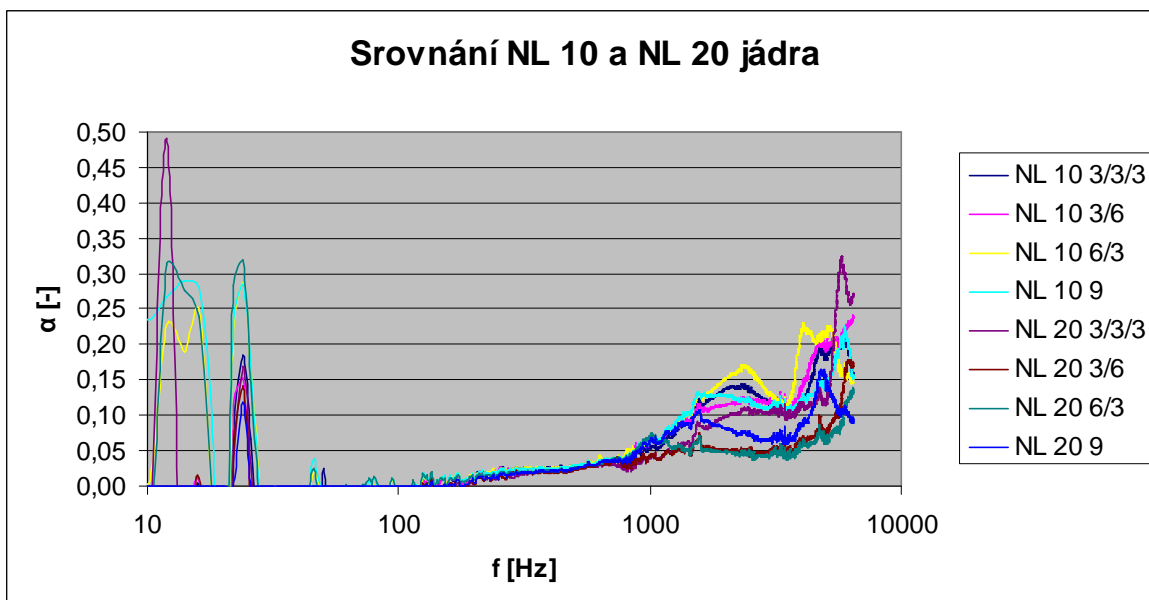


Obr. 68 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání korkového jádra typu NL 20

Na následujících grafech je zobrazeno srovnání sendvičových struktur s korkovým jádrem typu NL 10 a NL 20 pouze při měření bez mezery (mezi vzorkem a pevnou stěnou nebyla žádná mezera) a je patrné, že vzorky s materiálem jádra NL 10 jsou ohledně pohltivosti lepší než materiál NL 20 a to v celé měřené škále frekvencí (10 Hz až 6,4 kHz).



Obr. 69 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání korkového jádra typu NL 10 a NL 20



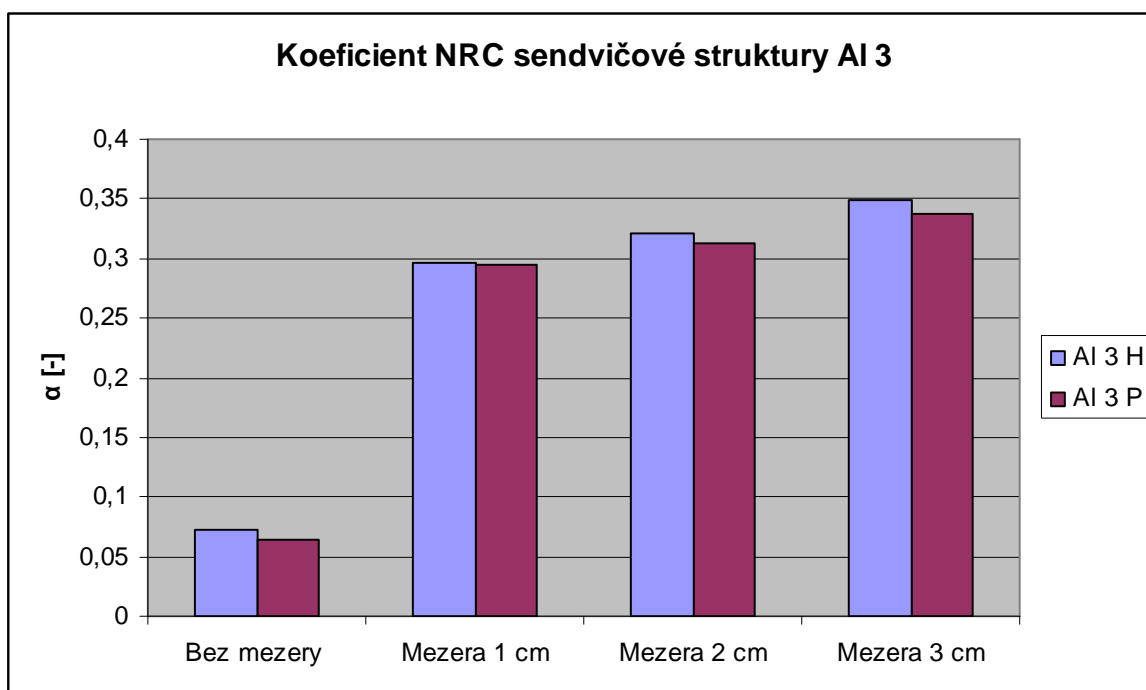
Obr. 70 Logaritmičeský graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání korkového jádra typu NL 10 a NL 20

7.1.5 Koeficient NRC $\bar{\alpha}_n$

NRC (Noise reduction coefficient) je materiálová veličina, která určuje schopnost materiálu pohlcovat zvuk. Dle dostupné literatury je NRC definován jako průměrná hodnota koeficientů α pro frekvence 250, 500, 1000 a 2000 Hz. V následující tabulce je znázorněn příklad koeficientu NRC u sendvičové struktury materiálu Al 3, v různých polohách vzorku od pevné stěny. Je zřejmé, že hrubá strana má větší pohltivost materiálu oproti straně pohledové, která má mnohem hladší povrch. Dalším poznatkem z tohoto měření je, že u vzorků, které neměly mezi sebou a pevnou stěnou vzduchovou mezeru, měly značně menší zvukovou pohltivost viz. Obr. 71.

Tab. 5 Koeficient NRC sendvičové struktury materiálu Al 3

| Druh měření | Al 3 H | Al 3 P |
|-------------|--------|--------|
| Bez mezery | 0,072 | 0,064 |
| 1cm mezera | 0,297 | 0,295 |
| 2cm mezera | 0,321 | 0,312 |
| 3cm mezera | 0,349 | 0,337 |



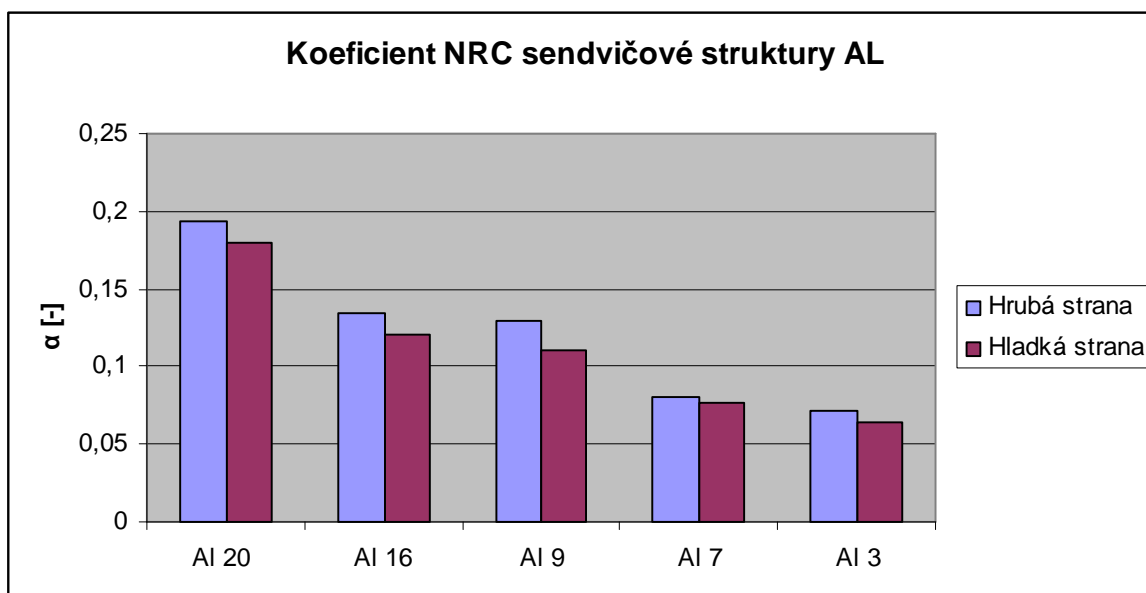
Obr. 71 Koeficient NRC sendvičové struktury materiálu Al 3

Předchozí tabulka a graf je pouhým výběrem naměřených hodnot, kompletní datové záznamy jsou obsaženy na příloženém CD.

Tab. 6 Koeficient NRC sendvičové struktury Al

| Typ materiálu | Hrubá strana | Hladká strana |
|---------------|--------------|---------------|
| Al 20 | 0,194 | 0,18 |
| Al 16 | 0,135 | 0,121 |
| Al 9 | 0,129 | 0,11 |
| Al 7 | 0,08 | 0,077 |
| Al 3 | 0,072 | 0,064 |

Na Obr. 72 je zřejmé, jaký vliv má tloušťka jádra na pohltivost sendvičové struktury. S rostoucí tloušťkou jádra koeficient NRC roste.

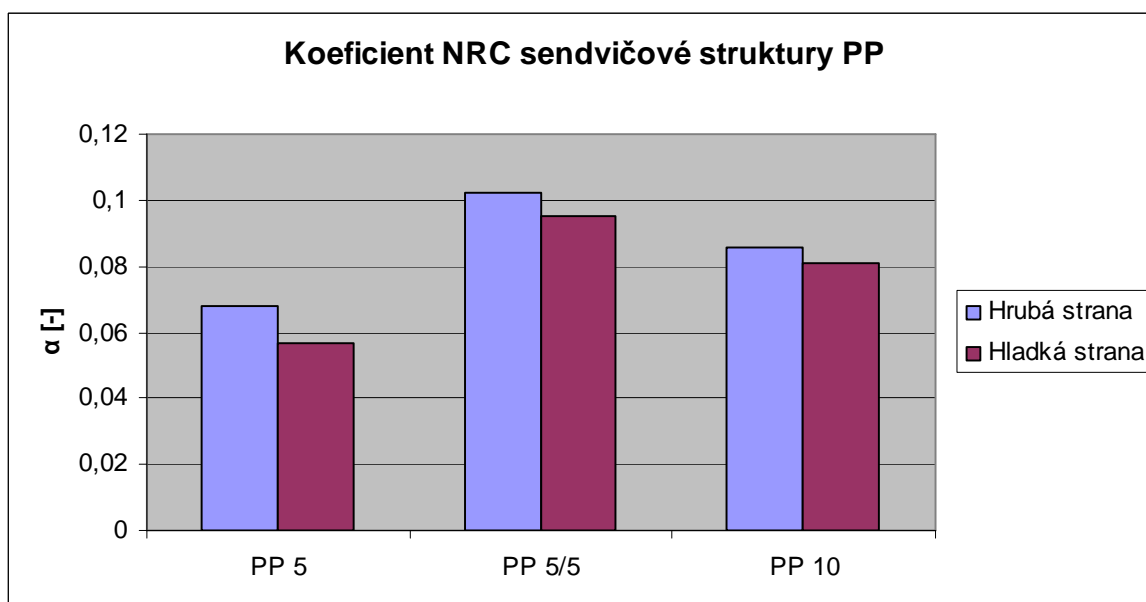


Obr. 72 Koeficient NRC sendvičové struktury Al

V (tab. 7) a Obr. 73 je patrné, že v sendvičové struktuře typu PP 5/5 oproti sendvičové struktuře typu PP 10 hraje roli střední vrstva prepregu poněvadž tloušťka obou vzorku je téměř totožná a koeficient NRC se u vzorku PP 5/5 zvýšil, jak u hrubé strany, tak u strany hladké a to přibližně o 0,015.

Tab. 7 Koeficient NRC sendvičové struktury PP

| Typ materiálu | Hrubá strana | Hladká strana |
|---------------|--------------|---------------|
| PP 5 | 0,068 | 0,057 |
| PP 5/5 | 0,102 | 0,095 |
| PP 10 | 0,086 | 0,081 |

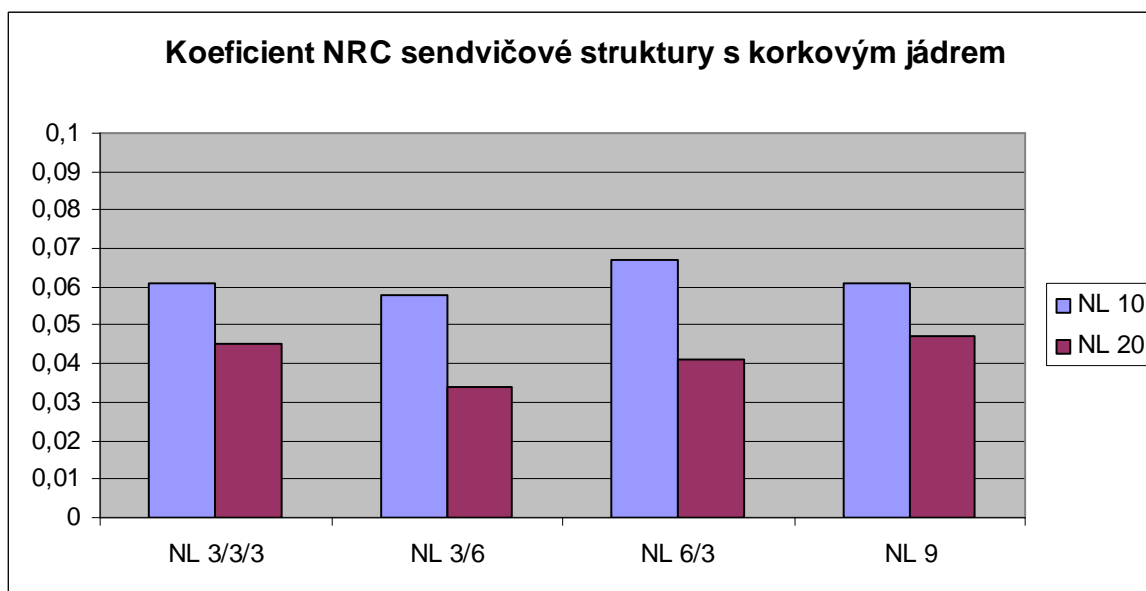


Obr. 73 Koeficient sendvičové struktury PP

Z Obr. 74 je patrné, že koeficient NRC je u sendvičové struktury s materiálem jádra NL 20 nižší než u materiálu NL 10 a to v rozsahu od 23 do 58 %. Dalším poznatkem z Obr. 74 je, že vzorek NL 3/6 má přibližně o 14 % nižší koeficient NRC u materiálu NL 10 a u materiálu NL 20 je tato hodnota nižší o 17 %.

Tab. 8 Koeficient NRC sendvičové struktury s korkovým jádrem

| Druhy vrstvení mat | NL 10 | NL 20 |
|--------------------|-------|-------|
| NL 3/3/3 | 0,061 | 0,045 |
| NL 3/6 | 0,058 | 0,034 |
| NL 6/3 | 0,067 | 0,041 |
| NL 9 | 0,061 | 0,047 |



Obr. 74 Koeficient NRC sendvičové struktury s korkovým jádrem

7.2 Tepelná vodivost λ

Tepelná vodivost daných sendvičových struktur byla naměřena v procesních laboratořích UTB na zařízení podle Fitsche. Pro výpočet tepelné vodivosti byly použity následující vzorce

$$A_1 = b - A_2, \quad (63)$$

$$\lambda = \frac{A_1 \cdot \delta \cdot K_1}{S}, \quad (64)$$

kde b je koeficient tepelných ztrát, A_2 jsou ztráty zařízení, δ je tloušťka vzorku, K je tepelná kapacita měřicího válečku a S je plocha měřicího válečku.

Příklad výpočtu sendvičové konstrukce s korkovým jádrem typu NL 10 9

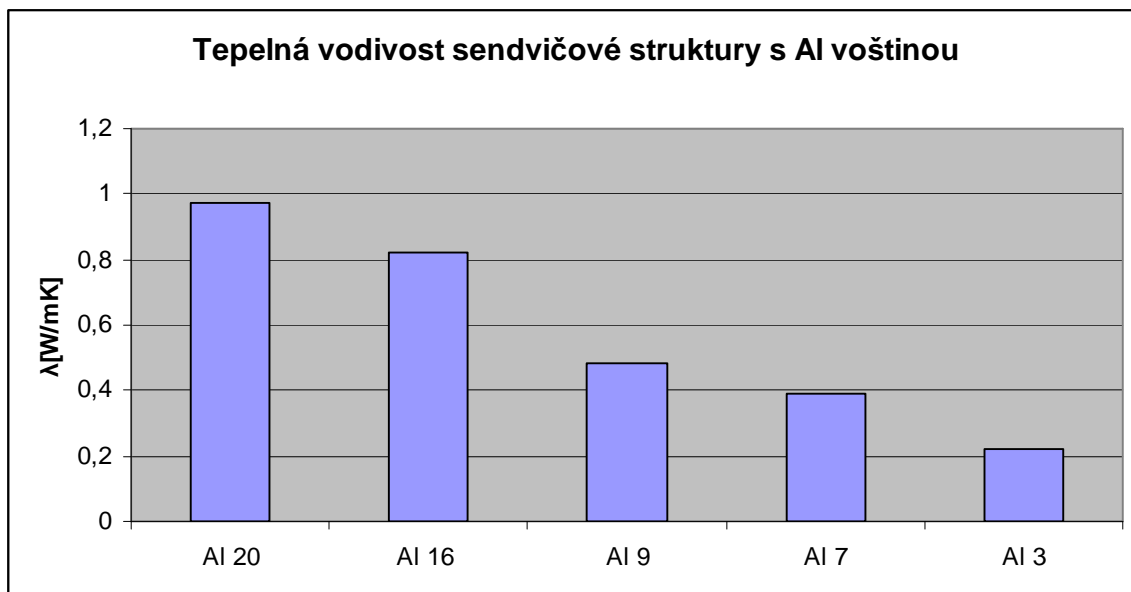
$$\begin{aligned} A_1 &= b - A_2 & \lambda &= \frac{A_1 \cdot \delta \cdot K_1}{S} \\ A_1 &= 0,00048118 - 0,000368 & \lambda &= \frac{0,000113 \cdot 9,1 \cdot 94,107}{1,9635} \\ A_1 &= 0,000113(s^{-1}) & \lambda &= 0,049W / m \cdot K \end{aligned}$$

Sendvičová struktura s Al voštinou je složená s tří materiálů (prepreg materiál vnějších vrstev, hliníková voština a vzduch obsažený v dutinách voštiny) o různé tepelné vodivosti a různých poměrech zastoupení v daných vzorcích, proto s měnící se tloušťkou voštiny se také mění tepelná vodivost celé sendvičové struktury. Hliník má tepelnou vodivost mnohokrát vyšší než další dvě složky v daných strukturách proto čím vyšší je zastoupení hliníku v struktuře tím vyšší je také tepelná vodivost celé sendvičové struktury.

Z Obr. 75 je také zřejmé že tepelná vodivost má téměř lineárně roste s tloušťkou vzorků.

Tab. 9 Tepelná vodivost sendvičové struktury s Al voštinou

| Materiál jádra | λ [W/mK] |
|----------------|------------------|
| Al 20 | 0,97 |
| Al 16 | 0,824 |
| Al 9 | 0,482 |
| Al 7 | 0,39 |
| Al 3 | 0,222 |

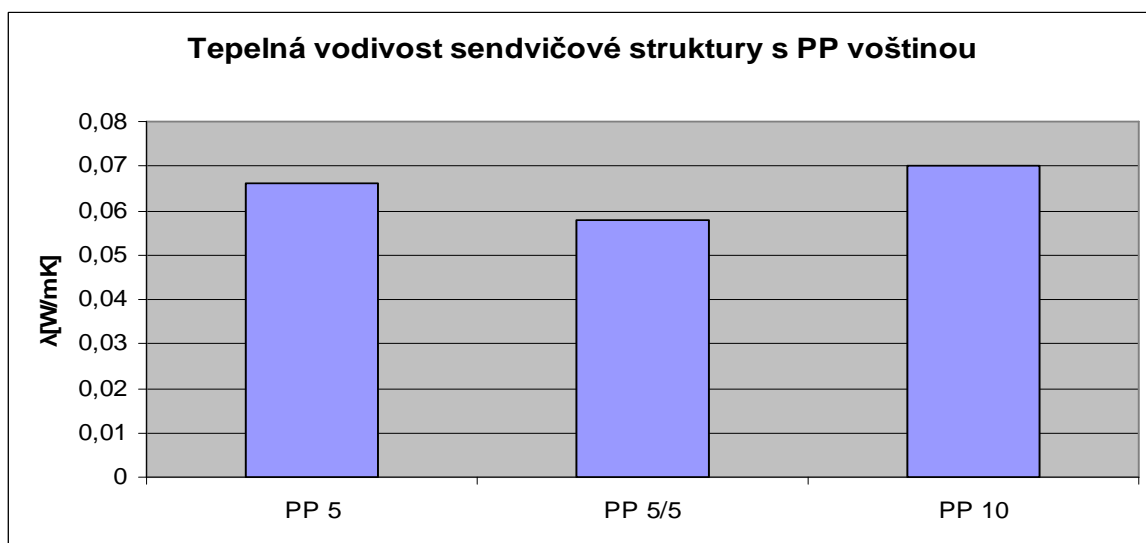


Obr. 75 Tepelná vodivost sendvičové struktury s Al voštinou

U vzorků s PP voštinou lze vidět z (Tab. 10), že vrstva prepregu mezi dvěma polypropylenovými voštinami (vzorek PP 5/5) snižuje tepelnou vodivost o 20 % oproti vzorku s jádrem o tloušťce 10 mm.

Tab. 10 Tepelná vodivost sendvičové struktury s PP voštinou

| Materiál jádra | λ [W/mK] |
|----------------|------------------|
| PP 5 | 0,066 |
| PP 5/5 | 0,058 |
| PP 10 | 0,07 |

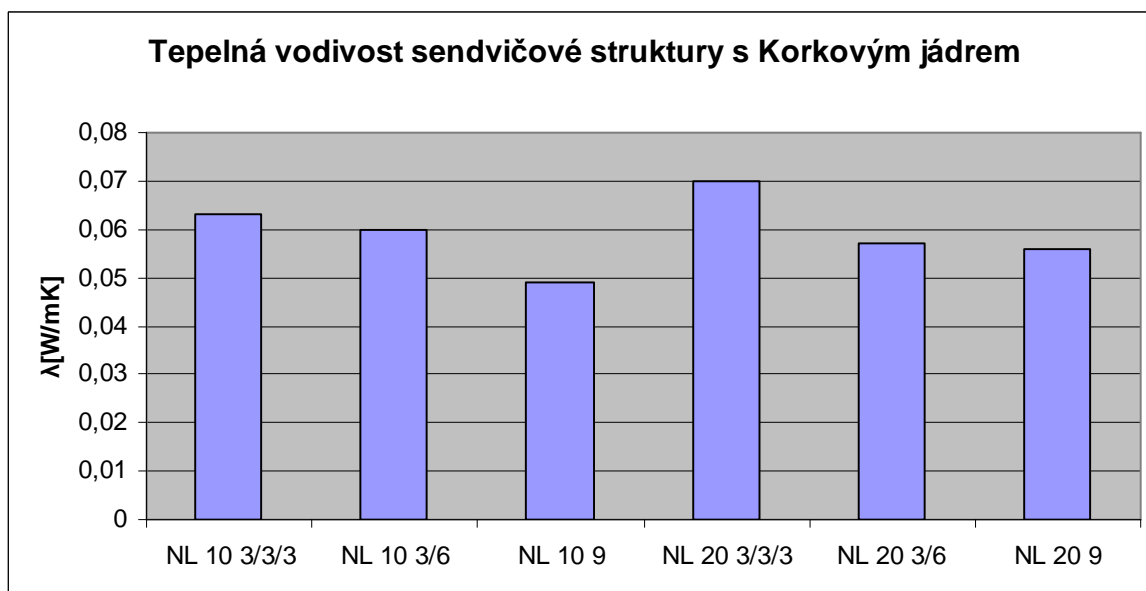


Obr. 76 Tepelná vodivost sendvičové struktury s PP voštinou

U vzorků s korkovým jádrem je tepelná vodivost nejnižší, a na Obr. 77 je patrné, že vnitřní vrstvy prepregu mezi korkovými pláty mají negativní vliv na tepelnou vodivost. Vzorky s dvěma vnitřními vrstvami prepregu mají přibližně o 25% větší tepelnou vodivost.

Tab. 11 Tepelná vodivost sendvičové struktury s Korkovým jádrem

| Materiál jádra | λ [W/mK] |
|----------------|------------------|
| NL 10 3/3/3 | 0,063 |
| NL 10 3/6 | 0,06 |
| NL 10 9 | 0,049 |
| NL 20 3/3/3 | 0,07 |
| NL 20 3/6 | 0,057 |
| NL 20 9 | 0,056 |



Obr. 77 Tepelná vodivost sendvičové struktury s korkovým jádrem

Veškeré datové záznamy z této kapitoly, které sloužily k výpočtům tepelné vodivosti všech vzorků, jsou obsaženy na příloženém CD.

8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zjistit akustickou absorpci (pohltivost) a tepelnou vodivost různých sendvičových struktur s měnicí se tloušťkou i materiálem jádra. Z výsledků, které byly naměřeny v laboratorních podmínkách, vyplynuly následující poznatky.

V měření pohltivosti je zřejmé, že hrubá strana má větší pohltivost materiálu oproti straně pohledové, která má mnohem hladší povrch. Tento jev je způsoben tím, že zvukové vlny nedopadají na hrubý povrch pod kolmým úhlem a v materiálu se různě odráží a jejich intenzita se snižuje. Dalším poznatkem z tohoto měření je, že u vzorků, které neměly mezi sebou a pevnou stěnou vzduchovou mezeru, měly značně menší zvukovou pohltivost. Dále bylo zjištěno, že s rostoucí tloušťkou jádra koeficient NRC roste. Je také patrné, že v sendvičové struktuře typu PP 5/5 oproti sendvičové struktuře typu PP 10 hraje roli střední vrstva prepregu poněvadž tloušťka obou vzorků je téměř totožná a koeficient NRC se u vzorku PP 5/5 zvýšil, jak u hrubé strany, tak i u strany hladké. Dále je patrné, že koeficient NRC je u sendvičové struktury s materiálem jádra NL 20 nižší než u materiálu NL 10 avšak umístění prepregů mezi korkové pláty nemá velký vliv na akustickou absorpci.

V měření tepelné pohltivosti je zřejmé, že sendvičová struktura s Al voštinou je složená ze tří materiálů o různé tepelné vodivosti a různých poměrech zastoupení v daných vzorcích. Proto se s měnicí se tloušťkou voštiny také mění tepelná vodivost celé sendvičové struktury. Hliník má tepelnou vodivost mnohokrát vyšší než další dvě složky v daných strukturách proto čím vyšší je zastoupení hliníku v struktuře tím vyšší je také tepelná vodivost celé sendvičové struktury. U vzorků s PP voštinou lze vidět, že vrstva prepregu mezi dvěma polypropylenovými voštinami snižuje tepelnou vodivost. U vzorků s korkovým jádrem je tepelná vodivost nejnižší a je patrné, že vnitřní vrstvy prepregu mezi korkovými pláty mají opět negativní vliv na tepelnou vodivost.

Závěrem lze konstatovat, že materiálů i druhů sendvičových struktur je velké množství a volba daných struktur závisí na konkrétním použití. Tepelná vodivost a akustická absorpce jsou pouze dva z důležitých faktorů podle, kterých se dané struktury volí. Tato diplomová práce by měla posloužit k vytvoření základu malé databáze použitelné k výběru sendvičových struktur s ohledem pouze na tyto dvě materiálové vlastnosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [6] NOVÝ R. Hluk a otřesy. 3. vyd. Praha : ČVUT, 1989. 190 s.
- [2] LUKOVICS I. Konstrukční materiály a technologie. VUT Brno, 1992
- [3] RUSNAKOVÁ S., Přednáška TAVKM: Kompozitné materiály.
- [4] PTÁČEK L. Nauka o materiálu II.. Brno, 2002.
- [5] MIŠUN V. Vibrace a hluk. 2. vyd. Brno : Nakladatelství CERM, 2005. 177 s.
- [6] SVOBODA E. a kol. Přehled středoškolské fyziky. 3.vyd. Praha : Nakladatelství Prométheus, 2003. 497 s. ISBN 80-7196-116-7
- [7] CHARVATOVA H., JANAČOVA D. a kol. Termofyzikální vlastnosti vybraných látek 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009. 123 s. ISBN 978-80-7318-787-3
- [8] VAŇKOVÁ M., a kol.: Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí, část I. Skriptum VUT Brno, 1995.
- [9] ROLEK, Studium prepreg sendvičových konstrukcí s fenologickou maticí [Diplomová práce]. Zlín 2012. UTB ve Zlíně. Fakulta technologická
- [10] JANAČOVÁ D., Přednáška UART: Sdílení tepla
- [11] KUNZEL G. Matematické modely sdílení tepla v konstrukcích elektroniky. Vydavatel Academia, 1990. 248 s. ISBN 80-2000-165-4
- [12] ŠKVOR, Z.: Akustika a elektroakustika. Vydavatel Academia, 2001. 528 s. ISBN 80-2000-461-1
- [13] MERHAUT, J.: Elektroakustika. Vydavatel ČVUT, 1984. 100 s.
- [14] KOLAT, P.: Přenos tepla a hmoty, VŠB-TU Ostrava, 2001.
- [15] JAHODA, M.: Sdílení tepla, VŠCHT Praha, UCHI, 2003
- [16] DVOŘÁK, Z.: Sdílení tepla a hmoty, ČVUT Praha, FS, 1992
- [17] KOLOMAZNÍK, K.: Teorie technologických procesů III, VUT Brno, FT Zlín, 1978
- [18] Shop.normy.biz – Metoda poměru stojaté vlny. [online], dostupné z WWW: <<http://shop.normy.biz/d.php?k=54724>>

- [19] Shop.normy.biz – Metoda v dozvukové komoře, [online], dostupné z WWW: <<http://shop.normy.biz/d.php?k=68915>>
- [20] Shop.normy.biz – Metoda přenosové funkce. [online], dostupné z WWW: <<http://shop.normy.biz/d.php?k=58530>>
- [21] PAVELEK, M.: Experimentální metody v technice prostředí, VUT Brno, 1997
- [22] NOŽIČKA, J.: Základy termomechaniky, ČVUT Praha, 2004
- [23] Malekjafarian. In: malekjafarian [online], dostupné z http://malekjafarian.com/?page_id=84
- [24] Ehrenstein, G.W.: Polymerní kompozitní materiály. Scientia Praha, 2009.
- [25] Zenkert, D., Nordic Industrial Fund: The Handbook of Sandwich Construction. Worcestershire; EMAS Publishing, 1997.
- [26] Davies, J.M.: Lightweight Sandwich Construction. London; Blackwell Science Publishing, 2001.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | | |
|------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| A | mm ² | Teplosměnná plocha |
| c | m/s | Rychlost šíření vlnění |
| C _p | J.K | Tepelná kapacita |
| E | Pa | Modul pružnosti v tahu |
| f | Hz | Frekvence |
| G | Pa | Modul pružnosti ve smyku |
| h | M | Výška |
| l | m | Délka |
| Q | J | Teplo |
| R | - | Součinitel odrazu |
| t | °C | Teplota |
| T | S | Perioda vlnění |
| α | | Součinitel přestupu tepla |
| δ | m | Tloušťka materiálu |
| λ | [Wm ⁻¹ · K ⁻¹] | Součinitel tepelné vodivosti |
| ϕ | - | Pórovitost |
| ρ | Kg/m ³ | Hustota |
| A _{1,2} | s ⁻¹ | Tepelné ztráty |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 1 Skladba vzorového sendvičového panelu [3] | 12 |
| Obr. 2 Rozložení namáhání při ohybu | 14 |
| Obr. 3 Struktura voštiny..... | 17 |
| Obr. 4 Hliníková voština..... | 17 |
| Obr. 5 Struktury polymerních pěn | 18 |
| Obr. 6 Tahový a tlakový diagram | 20 |
| Obr. 7 Výroba filmu matrice [9]..... | 22 |
| Obr. 8 Vzájemná konsolidace filmu matrice a vlákna [9]..... | 22 |
| Obr. 9 Jednokrokové horizontální a vertikální uspořádání výroby prepregů [9]..... | 23 |
| Obr. 10 Prahové křivky slyšitelnosti..... | 25 |
| Obr. 11 Vlnění v pružném prostředí [5] | 26 |
| Obr. 12 Odraz akustické vlny [5]..... | 29 |
| Obr. 13 Dopad paprsku na rozhraní [5] | 30 |
| Obr. 14 Rozdělení energie dopadené na překážku | 33 |
| Obr. 15 Princip měření činitele zvukové pohltivosti v Kundtově impedanční trubici metodou přenosové funkce [12] | 35 |
| Obr. 16 Rozdělení teploty t napříč deskou (teplotní profil)..... | 42 |
| Obr. 17 Rozdělení teploty t napříč složenou deskou [10]..... | 43 |
| Obr. 18 Průběh teplot u stěny [10]..... | 45 |
| Obr. 19 Prostup tepla | 47 |
| Obr. 20 Kundtova trubice | 51 |
| Obr. 21 Přístroj podle Fitche..... | 51 |
| Obr. 22 Uložení vzorku při měření..... | 52 |
| Obr. 23 Vzorek Al 20 | 53 |
| Obr. 24 Vzorek Al 16 | 54 |
| Obr. 25 Vzorek Al 9 | 54 |
| Obr. 26 Vzorek Al 7 | 54 |
| Obr. 27 Vzorek Al 3 | 55 |
| Obr. 28 Vzorek PP 5 | 55 |
| Obr. 29 Vzorek PP 10 | 56 |
| Obr. 30 Vzorek PP 5/5 | 56 |
| Obr. 31 Vzorek NL 10 3/3/3 | 57 |

| | |
|--|----|
| Obr. 32 Vzorek NL 10 3/6..... | 57 |
| Obr. 33 Vzorek NL 10 9 | 57 |
| Obr. 34 Vzorek NL 20 3/3/3..... | 58 |
| Obr. 35 Vzorek NL 20 6/3 | 58 |
| Obr. 36 Vzorek NL 20 9 | 58 |
| Obr. 37 Příklad odfrézované desky..... | 59 |
| Obr. 38 Odizolování vzorků | 59 |
| Obr. 39 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 20 H..... | 61 |
| Obr. 40 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 20 H | 61 |
| Obr. 41 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 16 H..... | 62 |
| Obr. 42 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 16 H | 62 |
| Obr. 43 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 9 H..... | 63 |
| Obr. 44 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 9 H | 63 |
| Obr. 45 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 7 H..... | 64 |
| Obr. 46 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 7 H | 64 |
| Obr. 47 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 3 H..... | 65 |
| Obr. 48 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti Al 3 H | 65 |
| Obr. 49 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání Al voštiny (hrubé a pohledové strany) | 66 |
| Obr. 50 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání Al voštiny (hrubé a pohledové strany) | 66 |
| Obr. 51 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání Al voštiny (hrubý povrch)..... | 67 |
| Obr. 52 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání Al voštiny (hrubý povrch)..... | 67 |
| Obr. 53 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti PP 5 H | 68 |
| Obr. 54 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti PP 5 H..... | 68 |
| Obr. 55 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti PP 5/5 H..... | 69 |
| Obr. 56 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti PP 5/5 H..... | 69 |
| Obr. 57 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti PP 10 H | 70 |
| Obr. 58 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti PP 10 H..... | 70 |
| Obr. 59 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání PP voštiny (hrubé a pohledové strany) | 71 |

| | |
|---|----|
| Obr. 60 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání PP voštiny (hrubé a pohledové strany) | 71 |
| Obr. 61 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání PP voštiny (hrubý povrch)..... | 72 |
| Obr. 62 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání PP voštiny (hrubý povrch)..... | 72 |
| Obr. 63 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti NL 10 3/3/3 | 73 |
| Obr. 64 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti NL 10 3/3/3..... | 73 |
| Obr. 65 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání korkového jádra typu NL 10..... | 74 |
| Obr. 66 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání korkového jádra typu NL 10..... | 74 |
| Obr. 67 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání korkového jádra typu NL 20..... | 75 |
| Obr. 68 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání korkového jádra typu NL 20..... | 75 |
| Obr. 69 Lineární graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání korkového jádra typu NL 10 a NL 20..... | 76 |
| Obr. 70 Logaritmický graf koeficientu zvukové pohltivosti, srovnání korkového jádra typu NL 10 a NL 20 | 76 |
| Obr. 71 Koeficient NRC sendvičové struktury materiálu Al 3..... | 77 |
| Obr. 72 Koeficient NRC sendvičové struktury Al..... | 78 |
| Obr. 73 Koeficient sendvičové struktury PP | 79 |
| Obr. 74 Koeficient NRC sendvičové struktury s korkovým jádrem..... | 80 |
| Obr. 75 Tepelná vodivost sendvičové struktury s Al voštinou..... | 82 |
| Obr. 76 Tepelná vodivost sendvičové struktury s PP voštinou | 82 |
| Obr. 77 Tepelná vodivost sendvičové struktury s korkovým jádrem..... | 83 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tab. 1 Změna tuhosti v závislosti na tloušťce jádra | 13 |
| Tab. 2 Střední frekvence v oktávových pásmech | 39 |
| Tab. 3 Vybrané hodnoty λ při teplotě 20°C [7] | 44 |
| Tab. 4 Značení vzorků v grafech | 60 |
| Tab. 5 Koeficient NRC sendvičové struktury materiálu Al 3..... | 77 |
| Tab. 6 Koeficient NRC sendvičové struktury Al..... | 78 |
| Tab. 7 Koeficient NRC sendvičové struktury PP | 79 |
| Tab. 8 Koeficient NRC sendvičové struktury s korkovým jádrem..... | 80 |
| Tab. 9 Tepelná vodivost sendvičové struktury s Al voštinou..... | 81 |
| Tab. 10 Tepelná vodivost sendvičové struktury s PP voštinou | 82 |
| Tab. 11 Tepelná vodivost sendvičové struktury s Korkovým jádrem | 83 |

SEZNAM PŘÍLOH NA CD

Akustická absorpce – logaritmické a lineární grafy

Grafy NRC

Tepelná vodivost – naměřené hodnoty

Tepelná vodivost - grafy