

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

AKUSTICKÝ PRVEK Z RECYKLOVANÝCH SUROVIN

**ACOUSTIC COMPONENT OF RECYCLED WASTE
MATERIALS**

ROZSAH PRÁCE A PŘÍLOH:

POČET STRAN: 76

POČET OBRÁZKŮ: 20

POČET TABULEK: 14

POČET PŘÍLOH: 5

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146134438

LIBEREC 2006

MICHAL POLÁČEK

Technická univerzita v Liberci

Fakulta textilní

Katedra netkaných textilií

Školní rok 2005 - 2006

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Pro **Michala P O L Á Č K A**
obor: 3106-T004 Netkané textilie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Akustický prvek z recyklovaných surovin**

Zásady pro vypracování :

1. Vypracujte rešerši potřebnou k řešení zadaného tématu (základní akustické pojmy, akustická měření, recyklační postupy k recyklaci textilu a plastů, konstrukce akustických izolací);
2. Navrhněte dvě varianty struktury akustického prvku z recyklovaných surovin pro izolaci hluku;
3. Vytvořte vzorky navržených akustických prvků a proveďte vhodná měření jejich akustických parametrů;
4. Diskutujte výsledky měření, problémy a vize aplikace recyklovaných materiálů v akustických izolacích.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá využitím textilních a plastikářských odpadů k výrobě akustických prvků. Obsahuje návrhy dvou typů konstrukce akustického prvku, výsledky měření akustické pohltivosti α navržených akustických prvků, diskutuje naměřená data, možnosti výroby i možnosti aplikace takových prvků.

Annotation

This diploma thesis deals with waste textile and waste plastic utilization for production of acoustic components. The thesis contains two designs of acoustic components, the results of measurement of sound absorption coefficient α and it discusses test data, the possibilities of production and applications of these designed components.

Klíčová slova

recyklované suroviny, netkaná textilie, fólie, akustický prvek, zvuková pohltivost

Keywords

recycled waste materials, nonwoven fabric, plastic foil, acoustic component, sound absorption

OBSAH PRÁCE

ÚVOD.....	7
Cíl práce.....	8
I TEORETICKÁ ČÁST.....	9
I.1 Rešerše.....	9
I.1.1 Akustika.....	9
I.1.1.1 Základní pojmy.....	9
I.1.1.2 Akustické prostředky snižování hluku.....	16
I.1.1.3 Metody a způsoby měření zvukové pohltivosti.....	31
I.1.2 Postupy recyklace textilních odpadů.....	35
I.1.2.1 Mechanické způsoby zpracování textilních odpadů do netkaných textilií.....	35
I.1.2.2 Termické způsoby zpracování odpadu plastů do fólií.....	41
I.2 Návrh akustického prvku.....	45
I.2.1 Konstrukce.....	45
I.2.2 Výrobní postup.....	46
I.2.3 Testování.....	50
II EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	51
II.1 Použité suroviny.....	51
II.1.1 Netkaná textilie.....	51
II.1.2 Fólie.....	51
II.2 Výroba vzorků akustického prvku.....	52
II.3 Měření zvukové pohltivosti α	54
III DISKUSE.....	56
IV ZÁVĚR.....	74
V PŘÍLOHY	

Seznam použitých symbolů

Hz	hertz
s	sekunda
m	metr
rad	radián
Pa	pascal
kg	kilogram
°C	Celsiův stupeň
W	watt
J	joule
dB	decibel
Ph	fón
ot	otáčky
NT	netkaná textilie
vl	vlna
PES	polyester
PAN	polyakrylonitril
ba	bavlna
PAD	polyamid
VS	viskóza
POE	polyetylén

ÚVOD

Zvuk, resp. hluk je neodmyslitelnou součástí našeho života. Je jedním ze základních prostředků zajišťujících přenos informací jak ve vztahu člověka s člověkem, tak ve vztahu člověka a přírody. Zajišťuje nám lepší orientaci v prostoru a slouží jako určitý výstražný či poplašný systém. Zvuk vnímáme jako příjemný např. při poslechu reprodukované hudby a naopak jako nepříjemný např. při práci s domácími spotřebiči. Definovat určitý zvuk jako příjemný či nepříjemný je ovšem obtížné, protože pro někoho může být hlukem a pro někoho důležitým informačním zdrojem. Pro snižování hluku silného, který narušuje činnost člověka, popřípadě ohrožuje a poškozuje jeho zdraví, je používána řada „pomůcek“. Mnohé z nich jsou vyráběny z recyklovaných surovin (např. protihlukové izolace automobilů).

Vědní obor, který se zabývá naukou o zvuku se nazývá akustika. Začala se vyvíjet v devatenáctém století, kdy byly pozorovány především zvuky hudebních nástrojů. Studium se tehdy zaměřovalo zejména na zvuky žádoucí a příjemné. V dnešní době jsou předmětem inženýrského zájmu ve větší míře zvuky nežádoucí a nepříjemné, které označujeme jako hluk.

V programech ochrany životního prostředí, které uplatňují vyspělé světové státy, zaujímá boj proti hluku pozici hned za ochranou ovzduší a povrchových vod. V řadě případů je „boj proti hluku“ spojován s využitím recyklovaných materiálů. To proto, že „forma“ recyklovaného materiálu vyhovuje pro akustické izolace lépe, než pouze vláknenný materiál (viz. např. produkty firmy Borgers pro automobilový průmysl).

Recyklované materiály jsou pro své vlastnosti vhodnou surovinou nejen k výrobě akustických prvků aplikovaných ve stavebnictví, automobilovém průmyslu, ale také k výrobě dalších průmyslových produktů, kterými jsou např. tepelné izolace, nenáročné průmyslové filtry, elastické komponenty v nábytkářství, čalounictví aj..

Využitím textilních a plastikářských odpadů k výrobě akustických prvků, které mají vykazovat dobrou zvukovou pohltivost α , popř. neprůzvučnost, se zabývá tato diplomová práce. Bude navržen, vyroben a testován akustický prvek z recyklovaného materiálu získaného trháním textilních odpadů (trhanin) a z fólie získané z recyklovaného polyetylénu.

Základ diplomové práce tvoří část teoretická, která obsahuje jednak stručné rešerše z oblasti akustiky a recyklace textilních odpadů i plastů, návrhy konstrukce studovaných akustických prvků a jejich testování a část experimentální, ve které je popsán provedený experiment a jeho výsledky.

Cíl práce

Jak již bylo v úvodu zmíněno, diplomová práce se zabývá studiem akustického prvku vyrobeného z recyklovaných surovin - trhaniny a fólie. Cíl práce byl formulován následovně:

1. Navrhnout akustický prvek aplikovatelný v konstrukci neprůzvučných izolací, které slouží např. ke snížení hluku strojů (kompresorů apod.).
2. Testovat zvukovou pohltivost navrhovaného prvku v podmínkách Technické univerzity v Liberci, tj. v dvoumikrofonové impedanční trubici.
3. Porovnat výsledky s akustickými prvky dostupnými na současném trhu a diskutovat aspekty využití recyklovaných materiálů pro akustické izolace.

I TEORETICKÁ ČÁST

I.1 Rešerše

Rešerše shrnuje základní poznatky o akustice (I.1.1) a známé postupy při zpracování a recyklování textilních odpadů a plastů (I.1.2).

I.1.1 Akustika

V této kapitole jsou uvedeny základní pojmy a definice užívané v akustice, základní akustické veličiny, současné akustické prvky a metody a způsoby měření akustických veličin.

I.1.1.1 Základní pojmy

1. Při zkoumání zvuku se zabýváme vlněním a to vlněním v pružném prostředí (vzduchu). Matematicky je tento dvojrozměrný děj (nezávislými proměnnými jsou prostor a čas) popsán rovnicí [1]:

$$x = A \cdot \cos \left[2 \cdot \pi \cdot \left(f \cdot t - \frac{r}{\lambda} \right) \right], \quad (1)$$

kde je: x - sledovaná veličina (tlak, rychlost, intenzita, výkon, aj.),

A - amplituda sledované veličiny,

f - frekvence [Hz],

t - čas [s],

r - odlehlost v prostoru [m],

λ - vlnová délka sledované veličiny [m].

2. Vzhledem k tomu, že při měření zvuku umísťujeme snímač (mikrofon) většinou do stabilní polohy, čímž se odlehlost stává konstantou, přestáváme hovořit o dvojrozměrné veličině- vlnění a přecházíme na jednosměrnou veličinu - kmitání, kde nezávislou proměnnou je pouze čas. [1] Pak platí rovnice:

$$x = A \cdot \cos (2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \vartheta) = A \cdot \cos (\omega \cdot t + \vartheta), \quad (2)$$

kde je: ϑ - počáteční fáze [rad], ω - úhlová frekvence [rad.s⁻¹].

3. Hluk je pouze podmnožinou zvuku a subjektivně se těžko hledá hranice mezi oběma pojmy.
4. Zvuk a vibrace spolu velice úzce souvisí, protože jsou pouze různým projevem téže příčiny.
5. Zvuk (hluk) je předmětem části fyziky, kterou nazýváme akustika. Snižování hluku souvisí i s dalšími vědními obory, kterými jsou např. nauka o materiálech, termomechanika, chemie aj..

Všeobecně se zvuk definuje jako vlnění hmotného prostředí, o kterém se můžeme přesvědčit sluchem. Jiná definice říká, že zvuk je mechanické vlnění pružného prostředí v kmitočtovém rozsahu normálního lidského sluchu.

Zvukovým vlněním v širším slova smyslu je jakékoli mechanické vlnění, jehož šíření látkami je podmíněno působením napětí resp. tlaků mezi sousedními objemovými elementy látky při jejich pružných deformacích. Zvukové vlnění je schopno budit zvukový vjem v lidském sluchovém orgánu ve frekvenčním pásmu 20 Hz - 20 kHz. Zvukové vlnění, jehož frekvence je nižší než 20 Hz se nazývá infrazvuk. Jestliže frekvence přesahuje 20 kHz, nazývá se ultrazvuk. [1]

Každý nežádoucí zvuk vyvolávající nepříjemný a rušivý vjem definujeme jako hluk. Hluk je směs různých tónů s náhodilými a neuspořádanými frekvencemi.

Základní akustické veličiny

Akustický tlak p [Pa]- je střídavý tlak superponovaný barometrickému tlaku při šíření zvuku a vyjadřuje tak odchylky od klidové hodnoty barometrického tlaku. Akustický tlak:

- je skalár,
- má charakter vlnění,
- je nejdůležitější veličinou, protože přístroje na snímání akustického tlaku jsou nejrozšířenější a principálně jednodušší než na snímání akustické rychlosti.

Barometrický tlak nabývá hodnot kolem 10^5 Pa, akustický tlak se pohybuje v rozmezí $2 \cdot 10^{-5}$ - $2 \cdot 10^2$ Pa (pro frekvenci 1 kHz). [1]

Akustická rychlost $\vec{u}$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]- je to rychlost, kterou se částice pohybují vlivem akustického tlaku kolem své rovnovážné polohy. Akustická rychlost:

- je vektor,

- je fyzikálně rovnocenná akustickému tlaku,
- je měřitelná, ale principy jejího měření se pro značnou složitost nepoužívají.

Akustická rychlost nabývá v pásmu mezi prahem slyšitelnosti a prahem bolestivosti zhruba hodnot $5 \cdot 10^{-8}$ - $1.6 \cdot 10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$. [1]

Rychlost šíření zvuku $c [\text{m.s}^{-1}]$ - vyjadřuje za jak dlouho překoná zvuková vlna v daném materiálu vzdálenost 1 m ve směru svého šíření. Rychlost šíření zvuku ve vzduchu o hustotě 1.21 kg.m^{-3} při 20°C je 344 m.s^{-1} . Rychlost zvuku:

- je vektor,
- nemá charakter vlnění.

Intenzita zvuku $I [\text{W.m}^{-2}]$ - je měřítkem akustické energie, která prochází za jednotku času skrz plošnou jednotku, kolmou na směr postupu vlnění. [1] Pro intenzitu vlnění $I [\text{W.m}^{-2}]$ platí vztah:

$$\vec{I} = \frac{E}{S \cdot t} = \frac{W}{S} = p \cdot \vec{u} \quad (3)$$

kde $E [\text{J}]$ je energie vlnivého pohybu, $S [\text{m}^2]$ je plocha, kterou zvukové vlnění prochází, $t [\text{s}]$ je čas potřebný pro průchod vlnění, $W [\text{W}]$ je průměrný zvukový výkon, $\vec{u} [\text{m.s}^{-1}]$ je akustická rychlost, $p [\text{Pa}]$ je akustický tlak.

Intenzita zvuku je:

- vektorová veličina,
- má charakter vlnění.

Akustický výkon $W [\text{W}]$ - je měřítkem celkové zvukové energie procházející plochou. Je dán integrálem skalárního součinu [1]:

$$W = \int_{(S)} \vec{I} \cdot d\vec{S}, \quad (4)$$

kde $d\vec{S}$ je vektor o velikosti $|dS|$ ležící ve směru normály na plochu, $S [\text{m}^2]$ je plocha, na které stanovujeme akustický výkon.

Akustický výkon:

- je skalární veličina,

- má charakter vlnění.

Vlnová délka λ [m]- charakterizuje zvukovou vlnu. Je to vzdálenost mezi jednotlivými periodicky se opakujícími maximami a minimami akustického tlaku. Platí vztah:

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T, \quad (5)$$

kde c je rychlost šíření zvuku [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], f je frekvence vlnění [Hz], T je perioda vlnění [s]. Vlnová délka je tedy vzdálenost, kterou zvuková vlna urazí za jednu periodu.

Perioda T [s]- nejkratší doba, za kterou se děj opakuje.

Hladiny akustických veličin

Člověk nevnímá zvuk absolutně. Jeho sluchový vjem se řídí Weber- Fechnerovým zákonem pro psychofyzické děje. Tento zákon říká, že počitek vzroste vždy o stejný přírůstek, jestliže popud, který vjem způsobuje, vzroste ve stejném poměru. Matematicky to lze vyjádřit následovně:

$$\Delta H = k \cdot \frac{\Delta P}{P}, \text{ kde } k \text{ značí konstantu, } \Delta H \text{ je přírůstek a } \Delta P \text{ je změna popudu. Diferenciál}$$

přírůstku je pak dán vztahem:

$$dH = k \cdot \frac{dP}{P}. \text{ Integrací dostaneme: } \int_0^H dH = k \cdot \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}. \text{ Řešením integrálu dostaneme}$$

konečný tvar:

$$H = k \cdot \ln \frac{P}{P_0}. \quad (6)$$

Obecně se hladina definuje takto:

$$H = \log \frac{P}{P_0}, \quad (7)$$

kde H [bel] značí hladinu sledované veličiny a vzhledem k nízkému rozsahu se užívá jednotka desetkrát menší- decibel [dB], P je hodnota srovnávaná (měřená), P_0 je hodnota srovnávací (vztažná).

Základem pro srovnávací (vztažné) hodnoty je velikost akustického tlaku na prahu slyšitelnosti pro frekvenci 1000 Hz. Prahová vztažná hodnota akustického tlaku je výchozím bodem logaritmické decibelové stupnice a je to nejslabší zvuk zaznamenaný lidským uchem zdravého mladého člověka. Ostatní vztažné hodnoty jsou uvedeny v tab.1.

Tab. 1: Srovnávací (vztažné) hodnoty pro výpočet akustických veličin:

Veličina	Označení	Hodnota
Akustický tlak	p_0	$2 \cdot 10^{-5}$ Pa
Akustická rychlost	u_0	$5 \cdot 10^{-8}$ m.s ⁻¹
Intenzita zvuku	I_0	10^{-12} W.m ⁻²
Akustický výkon	W_0	10^{-12} W.m ⁻²

➤ Základní vztahy pro hladiny akustických veličin

Sluchový počitek je zhruba úměrný akustické energii a tu vyjadřuje intenzita zvuku [1] a **hladina intenzity** zvuku je dána vztahem:

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}]. \quad (8)$$

Hladina akustického výkonu je určena vztahem:

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0} \quad [\text{dB}]. \quad (9)$$

Pro **hladinu akustického tlaku** platí vztah:

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad [\text{dB}]. \quad (10)$$

Vztah (10) lze po matematické úpravě vyjádřit následovně:

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{P}{P_0} \quad [\text{dB}]. \quad (11)$$

Pro **hladinu akustické rychlosti** analogicky platí:

$$L_u = 20 \cdot \log \frac{u}{u_0} \quad [\text{dB}]. \quad (12)$$

Hladina hlasitosti L_N daného zvuku je rovna hladině akustického tlaku čistého harmonického tónu s frekvencí 1 kHz, který je považován posluchačem s normálním sluchem za standardních poslechových podmínek za stejně hlasitý, jako vyšetřovaný zvuk. [2] Hladina hlasitosti je subjektivní fyzikální veličina, která závisí na citlivosti lidského ucha. Weberův-Fechnerův zákon pro hladiny sledovaných veličin nesleduje přesně subjektivní změnu hlasitosti, protože je vzhledem k vztažným hodnotám platný pouze pro frekvenci 1 kHz. Pro tuto frekvenci platí, že hladina intenzity zvuku je totožná s hladinou hlasitosti L_N :

$$L_N = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{Ph}]. \quad (13)$$

Jednotkou hladiny hlasitosti je fón. Hladina hlasitosti tónu s frekvencí 1 kHz vyjádřená ve fónech je rovna hladině jeho akustickému tlaku. Pro tento tón 1 fón odpovídá 1 dB.

Tab. 2: Druhy zvuků různé hladiny hlasitosti, resp. hladiny intenzity zvuku.

Druh zvuku	Hladina hlasitosti [Ph] = hladina intenzity zvuku [dB]
Zvukový práh	0
Šelest listí	10
Šum listí	20
Pouliční hluk v tichém předměstí	30
Tlumený rozhovor	40
Normální pouliční hluk	50
Hlasitý rozhovor	60
Hluk na silně frekventovaných ulicích velkoměsta	70
Hluk v tunelech podzemních železnic	80

Hluk motorových vozidel	90
Maximální hluk motorky	100
Hlasité obráběcí stroje	110
Startující letadlo ve vzdálenosti 1m	120
Hluk působící bolest	130

Účinky hluku na člověka

Účinek hluku je určen jeho intenzitou. V prostředí, kde je nízká hladina akustického tlaku se člověk moc dobře necítí. Za hluboké ticho většina lidí považuje hodnoty okolo 20 dB. Jako ticho příjemné považují lidé hodnoty okolo 30 dB. Okolo hranice 65 dB a výše se projevují účinky hluku změnami vegetativních reakcí. K trvalým poruchám sluchu a účinkům na nervovou soustavu člověka dochází při soustavném pobytu v prostředí, kde hladina akustického tlaku převyšuje hodnotu 85 dB. 130 dB způsobuje ve sluchovém orgánu bolest a při 160 dB dochází k protržení bubínku.

Tab. 3: Účinky zdrojů hluku

Hluk [dB]	Účinek
0-20	práh slyšitelnosti; prakticky nemožné pozorovat; prakticky obtížně měřitelné
20-30	nejnižší měřitelná slyšitelnost; bez vlivu na koncentraci
30-40	možný vliv na kvalitu spánku
40-50	snižuje schopnost soustředění
50-60	normální zábava vyžaduje hlasitější hovor
60-70	vegetativní problémy a výpadky výkonu
70-80	při častějším výskytu způsobuje větší vegetativní problémy
80-90	delší působení není únosné
90-100	nutná ochrana sluchu
100-110	vleklá poškození sluchu
110-120	hranice bolestivosti
120-130	fyzická poškození
130-140	akutní nezvratná poškození sluchu i při krátkém působení

Hluk snižuje bezpečnost, produktivitu a kvalitu práce. Je prokázáno, že se proto z ekonomického hlediska vyplatí investovat do akustických prostředků snižování hluku navzdory vynaloženým nákladům na jejich zabezpečení.

I.1.1.2 Akustické prostředky snižování hluku

V dnešní vědeckotechnicky rozvinuté době, kdy téměř do všech oblastí našeho života vstoupila hlučná strojní a elektrická zařízení, bychom asi těžko hledali významnější skupinu lidí, která by nebyla denně ve značné míře exponována akustickou energií. Naším současným zájmem je omezení nepříznivých účinků akustické energie na člověka a zastavení růstu hlučnosti v životním prostředí. Jedním možným opatřením řešící hlukovou situaci je použití akustických prostředků snižování hluku.

Materiály a konstrukce pro pohlcování zvuku

Zvukové vlny vyzářené nějakým zdrojem do okolí, se po dopadu na nějakou překážku částečně odrážejí a částečně překážkou procházejí. Jestliže chceme snížit hluk v prostoru, v němž je zdroj zvuku umístěný, musíme snížit odrážející se zvukovou energii. Pro tento účel slouží absorbéry (pohlcovače) zvuku, které jsou schopné pohlcovat dopadající zvukový výkon. Základní akustickou vlastností látek pro pohlcování zvuku je přeměna akustické energie na teplo, která je dána kmitočtovou závislostí činitele zvukové pohltivosti α .

Absorpční materiály můžeme rozdělit podle struktury na pórovité a vláknité. Pórovitými materiály jsou např. polyuretanové pěny. Ten se používá zejména tam, kde nehrozí nebezpečí požáru. Vláknité pohlcovače jsou tvořeny např. z vláken skleněných nebo minerálních. Vyrábějí se ve formě desek, rohoží apod.. Tyto materiály mají použití na místech, kde jsou vystaveny vyšším teplotám. Dalšími běžně využívanými materiály jsou např. vlákna bavlněná, polyesterová nebo jutová.

V praxi hrozí, že se efektivita pohlcovačů sníží vlivem zanesení jejich vzduchových buněk. Proto se na ně aplikují např. polyetylenové fólie a další plastické materiály, které ovšem způsobí částečné snížení absorpční schopnosti v oblasti vysokých kmitočtů. Jsou-li ovšem tyto materiály minimálně na 25 % povrchu perforovány, není schopnost pohltivého materiálu znehodnocena. Přitom je výhodnější větší počet otvorů o malém průměru než malý počet velkých otvorů. [3]

Aplikace zvukově-pohltivých materiálů slouží jednak k zabezpečení podmínek pro poslech hudby či řeči nebo ke snížení hluku. V prvním případě je nutné zajistit optimální

dobu dozvuku, čehož lze dosáhnout množstvím pohltivého materiálu v prostoru. Jedná se o divadla, kinosály, zasedací místnosti apod. Ve druhém případě, jde o snížení nepříjemného hluku v prostorech jako jsou průmyslové výrobní haly, sportovní haly apod.

➤ Parametry ovlivňující zvukovou pohltivost

Jedním z nejvýznamnějších parametrů ovlivňujících mechanismus pohlcování je jejich tloušťka. V případě použití textilie jako zvukového absorbéru je tloušťkou vzdálenost mezi její lící a rubní stranou. Přitom je textilie stlačená mezi dvěma rovnoběžnými destičkami pod stanoveným tlakem. Studie [4] potvrzuje, že čím má materiál větší tloušťku, tím je činitel zvukové pohltivosti α vyšší v oblasti nižších frekvencí. S tloušťkou textilie souvisí další významný parametr, kterým je měrná hmotnost.

Plošná hmotnost se uvádí v g/m^2 a vyjadřuje kolik gramů materiálu připadá na plochu 1 m^2 . Objemová hmotnost se uvádí v kg/m^3 a vyjadřuje jaká je hmotnost materiálu připadající na 1 m^3 . Objemová hmotnost určuje zaplnění textilie, tj. poměr objemu vláken k celkovému objemu vlákenné vrstvy.

Dalším faktorem ovlivňujícím strukturu vlákenné vrstvy a mechaniku pohlcování jsou parametry vláken. Významným parametrem je průměr vláken související s jemností vláken. V práci [5] se potvrdilo, že s rostoucí jemností vláken ve vlákenné vrstvě dochází ke zvýšení činitele zvukové pohltivosti α v závislosti na frekvenci f . S jemností vláken roste jejich měrný povrch a dochází ke zvýšení třecích ztrát, což má za následek snížení akustické energie a zvýšení činitele zvukové pohltivosti α .

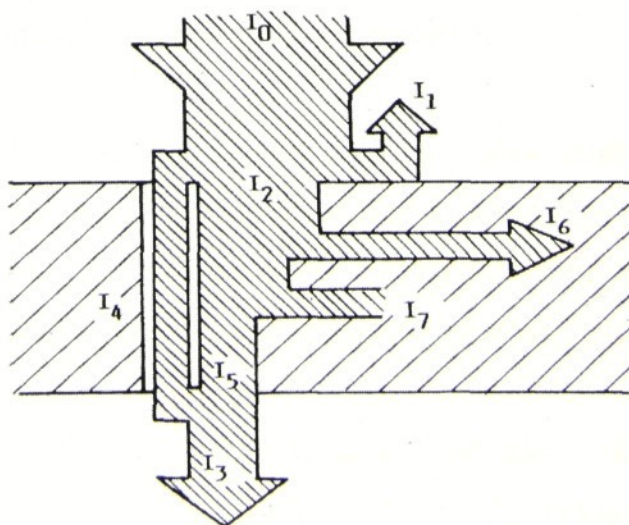
Poróznost je parametr vyjadřující jaký objem dutin je v celkovém objemu materiálu. Porézním materiálem je z akustického hlediska pevná látka, která ve svém objemu obsahuje malé dutinky vyplněné vzduchem. Poměr objemu těchto dutinek k celkovému objemu porézní látky je dosti značný a činí asi 60 až 95 % celkového objemu. [6] Kostra těchto látek je z vláknitých materiálů nebo ztuhlých pěn. Aby látka dobře pohlcovala zvuk, musejí být její póry navzájem spojeny. To umožňuje šíření zvuku látkou, resp. proudění zvuku při akustickém kmitání. Větší činitel zvukové pohltivosti α mají tedy materiály pórovité (závěsy, koberce, technické plstě, apod.), oproti tomu látky kompaktní a hladké (kov, hladký beton, dlaždice, mramor, sádrová omítka aj..) mají tento činitel velmi malý. U látek, jejichž kostra je velmi poddajná a elastická, nemusejí být póry spojeny, poněvadž zvuk z pórů snadno přechází do celé kostry. Příkladem těchto látek jsou pěněné měkké umělé hmoty.

U vláknenných materiálů je také důležitá struktura a orientace vláken. Lze konstatovat, že činitel zvukové pohltivosti α vláknenných materiálů s uspořádáním vláken kolmo na směr zvuku je vyšší než u paralelně uspořádaných materiálů. Pokud jsou vlákna uspořádána kolmo na směr šíření podélné zvukové vlny, mají schopnost se vlivem dopadajících zvukových vln rozkmitávat a přeměňovat akustickou energii na energii kinetickou a následně na teplo. Jestliže jsou vlákna orientována ve směru šířící se zvukové vlny, tzn. paralelně, tak nevykazují rezonanční efekt. [7] Nekladou tedy odpor jejímu dalšímu postupu a umožňují jí tak snazší průchod skrz materiál.

➤ Činitel zvukové pohltivosti

Abychom mohli lépe sledovat vlastnosti pohltivých látek, zmíníme se stručně o veličinách pomocí kterých tyto vlastnosti charakterizujeme. Co se děje s akustickou energií při dopadu na nějakou překážku nejlépe ukazuje schéma na obr. 1. Akustický výkon dopadající na 1 m^2 stěny, označený jako intenzita zvuku I_0 , se rozdělí na tyto části:

- I_1 - intenzita zvuku vlny odražené,
- I_2 - intenzita zvuku vlny pohlcené,
- I_3 - intenzita zvuku vlny vyzářené za stěnu celkem,
- I_4 - intenzita zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry,
- I_5 - intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru,
- I_6 - intenzita zvuku vlny vedená ve formě chvění do ostatních částí konstrukcí,
- I_7 - intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo.



Obr. 1: Schéma rozdělení akustické energie při dopadu zvukové vlny na stěnu.

Schopnost tělesa pohlcovat zvuk charakterizujeme hodnotou činitele zvukové pohltivosti α [-]. Tento činitel je definován jako poměr intenzity zvuku vlny pohlcené povrchem I_2 [W.m^{-2}], k intenzitě I_0 [W.m^{-2}], která na tuto plochu dopadá, což je vyjádřeno výrazem:

$$\alpha = \frac{I_2}{I_0}, \quad (14)$$

Hodnota zvukového činitele α se může pohybovat v intervalu od 0 do 1. Stěna pohlcující 100 % zvuku, má činitel pohltivosti $\alpha = 1$, oproti tomu stěna dokonale odrazující zvuk má tento činitel roven nule.

Podobným způsobem lze definovat činitele zvukové odrazivosti β [-]:

$$\beta = \frac{I_1}{I_0}, \quad (15)$$

kde I_1 [W.m^{-2}] je intenzita zvuku vlny odražené a I_0 [W.m^{-2}] je intenzita zvuku, která na plochu dopadá.

Činitele průzvučnosti τ [-] lze definovat takto:

$$\tau = \frac{I_3}{I_0} = \frac{I_4 + I_5}{I_0}, \quad (16)$$

kde I_3 [W.m^{-2}] je intenzita zvuku vlny vyzářené za materiál celkem, I_4 [W.m^{-2}] je intenzita zvuku vlny prošlé materiálem otvory a póry a I_5 [W.m^{-2}] je intenzita, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru.

Toto rozdělení dopadající akustické energie na jednotlivé složky vyhovuje v oblasti prostorové akustiky. Při navrhování zvukově-izolačních konstrukcí je však třeba znát podíl akustické energie přeměněné ve stěně na teplo. Zavedeme proto další veličinu, činitel přeměny ε , který vyjadřuje podíl mezi energií přeměněnou ve stěně na teplo a energií na stěnu dopadající.

Ve schématu na obr. 1 je vyznačená hodnota I_6 . V případě zvukově-izolačních krytů, jejichž stěny jsou z ocelového plechu, je prakticky rovna nule. Potom můžeme na základě platnosti zákona o zachování energie psát vztah:

$$\beta + \tau + \varepsilon = 1. \quad (17)$$

Z porovnání uvedených vztahů dále vyplývá, že

$$\alpha = \varepsilon + \tau. \quad (18)$$

Z hlediska prostorové akustiky se obvykle nezajímáme, co se stane s energií pohlcenou. V podstatě se zajímáme o akustickou energii, která se od stěny po dopadu vrací zpět do prostoru místnosti, kde má být zajištěn např. kvalitní přenos hudby, zpěvu nebo mluveného slova. Naopak chceme-li snižovat hluk, máme obvykle zájem opačný. Nechceme aby se z určitého ohraničeného hlučného prostoru šířila akustická energie do prostorů sousedních. Cílem bude, aby hodnota činitele průzvučnosti τ byla co nejmenší. Využije se tedy vlastnosti materiálu přeměňovat akustickou energii na teplo s cílem omezit odrazy akustické energie od stěn a snížit hladinu akustického tlaku v poli odražených vln.

➤ Mechanismus pohlcování zvuku

Pod pojmem pohlcování zvuku máme z hlediska fyzikálního na mysli přeměnu zvukové energie v energii jinou, obvykle tepelnou. Podle použití můžeme pohltivé látky rozdělit do dvou skupin [6]:

1. skupina zahrnuje látky a konstrukce, jejichž účelem je pohlcovat zvukové vlny dopadající na jejich povrch a obvykle se nezajímáme o to, jestli se zvuk šíří dále za látku a proniká do dalšího prostoru, tzn. zda-li je skutečně látkou pohlcen a přeměněn v energii jinou. Tyto látky a konstrukce se používají pro účely prostorové akustiky a snižování hladiny hluku v uzavřených prostorech zvýšením pohltivosti stěn.

2. skupina látek a konstrukcí se používá pro účely zvukově izolační. Proto se u nich zajímáme o to, do jaké míry tlumí zvuk při jeho šíření. V mnoha případech však můžeme určitou pohltivou látku používat k oběma účelům.

Princip přeměny zvukové energie při šíření v pevných látkách můžeme rozdělit na tři skupiny [6]:

- a) přeměny vznikající třením,
- b) přeměny vznikající poklesem akustického tlaku,
- c) přeměny vznikající nepružnou deformací těles.

Akustická energie se třením přemění v tepelnou, jestliže se vzduch pohybuje v blízkosti určité plochy. Plocha, na níž dochází k tření, musí být dostatečně veliká, aby se přeměnilo dostatečné množství energie. Z tohoto důvodu se pro pohlcování zvuku používají porézní materiály, u nichž se zvuk šíří jemnými póry. Celková plocha pórů je vzhledem k objemu materiálu značně veliká.

Tlaková ztráta vzniklá třením v pórech je úměrná kvadrátu efektivní akustické rychlosti.

Při šíření zvukové vlny látkou dochází ke zhuštění molekul vzduchu a stoupnutí celkového tlaku. Dojde-li ke snížení nebo relaxaci tlaku, sníží se i potenciální energie a energie zvukové vlny. Příčin relaxace akustického tlaku může být mnoho. Stlačení vzduchu má za následek zvýšení teploty. Soustava pórů ovšem není od kostry dobře izolována a tak dochází k přestupu tepla do kostry. Tím dochází ke snížení teploty vzduchu a ke snížení tlaku.

Přeměny zvukové energie vlivem nepružné deformace probíhají u těles, které se vyznačují tzv. pružnou hysterezí. Jestliže stlačíme těleso vykazující tuto vlastnost, nevrátí se po působení síly do původního stavu. To znamená, že práce vynaložená na deformaci tělesa je větší, než práce vykonaná pružným tělesem při návratu do původního stavu. Tento rozdíl představuje úbytek zvukové energie, který je zapříčiněn činitelem vnitřního tlumení zvuku v materiálu.[6]

Pohltivé konstrukce můžeme rozdělit do dvou skupin:

- a) uspořádání chovající se jako kmitající membrány nebo desky,
- b) uspořádání spočívající na principu Helmholtzova rezonátoru.

Pro rezonanční soustavu je charakteristické, že se vždy skládá z určité hmoty upevněné na pružině o určité tuhosti. Pohyb hmoty je ovlivňován ještě třením, resp. odporem proti pohybu. Pro určitý kmitočet se dostane hmota spolu s poddajností do stavu rezonance, což znamená, že amplituda výchylky hmoty bude maximální. Dopadne-li na uvažovanou akustickou soustavu zvukové vlnění, uvede ji do vynuceného kmitání, přičemž amplituda kmitů bude maximální pro kmitočet rezonanční. Přestane-li dopadat vlnění na soustavu, bude ještě po jistou dobu dokmitávat na vlastním (rezonančním) kmitočtu. [6]

Pod pojmem kmitající membrána rozumíme tenkou desku nebo fólii, jejíž tuhost v ohybu je velmi nepatrná a která je upevněna na rámu v určité vzdálenosti od pevné stěny. Membrána představuje hmotnost m . Vzduchový polštář vytváří pružinu, jejíž tuhost je k . Prostor mezi membránou a zadní pevnou stěnou bývá vyplněn porézním materiálem, který tlumí kmitání částic vzduchu v tomto prostoru a tím i celou soustavu. Obvykle se volí

membrána z takové látky, která zajistí, aby její ohybová tuhost byla ve srovnání s tuhostí vzduchového polštáře mnohem menší. Proto se vliv membrány na okraji prakticky neprojeví a membrána se bude pohybovat jako celek podobně jako kmitající píst. Při rezonančním kmitočtu dochází k maximálnímu pohlcování akustické energie. Je-li za membránou pouze vzduch, vykazuje křivka pohltivosti ostré maximum. Bude-li prostor za membránou vyplněn pohltivým materiálem, křivka vyjadřující absorpci zvuku bude mít nižší maximum, ale zvětší se šířka kmitočtového pásma, kde dochází k významnému pohlcování zvuku. Kmitající desky se od membrán liší především svou tuhostí, která obvykle tuhost vzduchového polštáře značně převyšuje. [6]

Druhým typem rezonančních soustav, používaných k pohlcování zvuku, jsou konstrukce založené na principu Helmholtzova rezonátoru. Rezonátory bývají umístěné buď jednotlivě nebo jsou sdružené do děrovaných panelů. Jednotlivě rozmístěné rezonátory v prostoru se používají v praxi velmi zřídka a to pro pohlcování nejnižších zvukových kmitočtů v případech, kdy z nějakého důvodu nelze použít kmitající membrány nebo desky. Často jsou však používány tzv. děrované panely, které jsou tvořeny tuhou deskou umístěnou v určité vzdálenosti od stěny a opatřenou kruhovými nebo kuželovými otvory, případně drážkami. [6]

➤ Některé v praxi používané výrobky pro pohlcování zvuku strojů

Absorbér ze skleněných vláken [8]

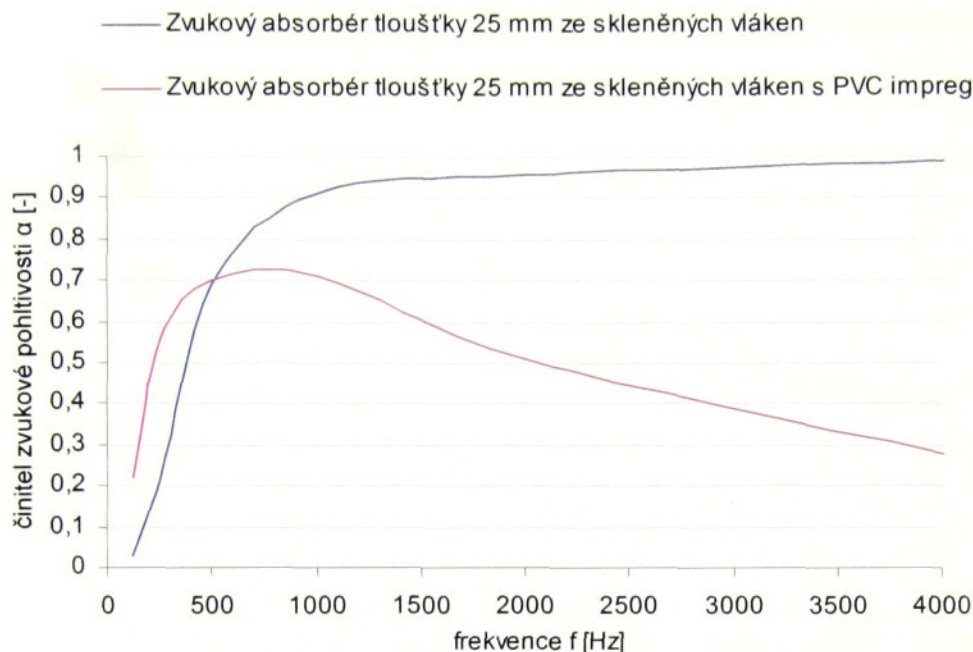
Jedná se o rohož ze skleněných vláken objemové hmotnosti 64 kg/m^3 a tloušťky 25 mm. V jiném provedení je na povrchu plstěné desky z obou stran polyvinylchloridová impregnace chránící před olejem, prachem apod..

Aplikace: obklady ve strojních dílnách, obklady potrubí a šachet, obklady pump a jiných elektricky poháněných strojů, obklady skříní mobilních dynam, obklady kompresorů aj.. Výrobek bez impregnace má použití do 177°C a s impregnací do 232°C .

Tab. 4: Hodnoty činitele zvukové pohltivosti α absorbérů tloušťky 25 mm ze skleněných vláken bez impregnace (č. 1) a s PVC impregnací (č.2).

č.	Činitel zvukové pohltivosti α [-]					
	Frekvence f [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	0,03	0,22	0,69	0,91	0,96	0,99
2	0,22	0,56	0,7	0,71	0,51	0,28

Graf 1: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α absorberu ze skleněných vláken (64 kg/m^3) bez impregnace a s PVC impregnací na frekvenci f .



Zvukově absorpční panely [8]

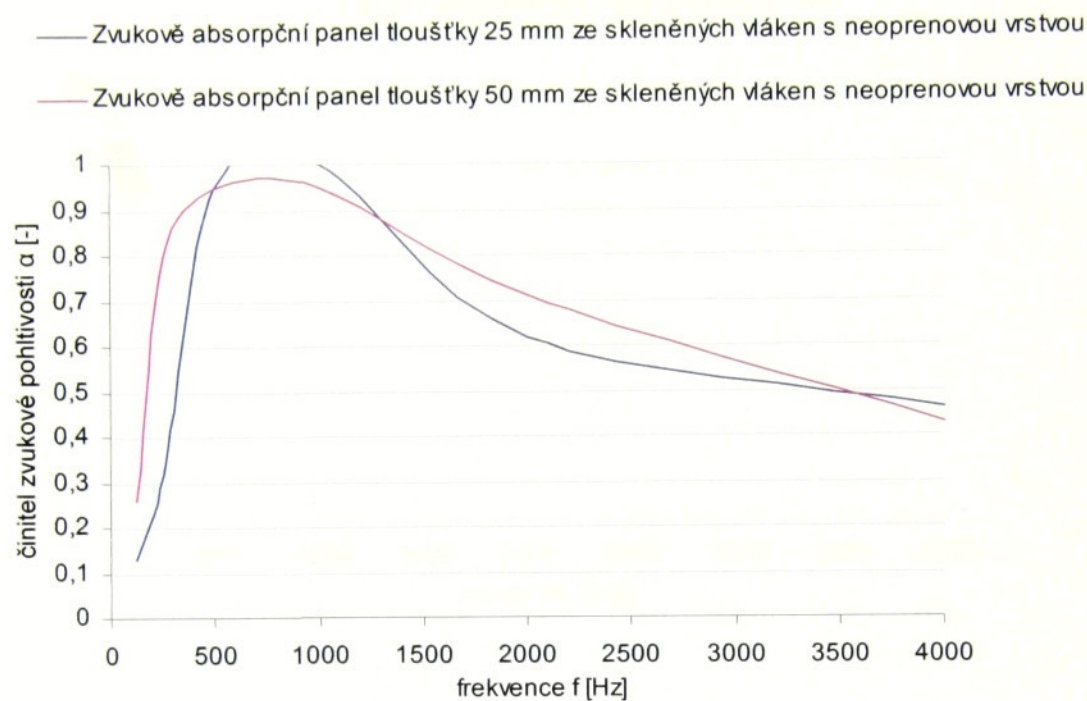
Rohož ze skleněných vláken o objemové hmotnosti 48 kg/m^3 je potažena chránicí neoprenovou vrstvou tloušťky $0,254 \text{ mm}$. Tyto dvě komponenty jsou společně potaženy do polyesterové fólie nebo hliníkem pokovené polyesterové fólie.

Aplikace: pláště různých strojů, skříně kompresorů, kryty motorů aj.. Použití od -40°C do 232°C .

Tab. 5: Hodnoty činitele zvukové pohltivosti α zvukově absorpčních panelů ze skleněných vláken s chránicí neoprenovou vrstvou.

Tloušťka [mm]	Číselný koeficient zvukové pohltivosti α [-]					
	Frekvence f [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
25	0,13	0,32	0,95	1	0,62	0,46
50	0,26	0,8	1	1	0,71	0,43

Graf. 2: Porovnání závislostí činitele zvukové pohltivosti α zvukově absorpčního panelu ze skleněných vláken (48 kg/m^3) s neoprenovou vrstvou na frekvenci f .



Pěnové panely [9]

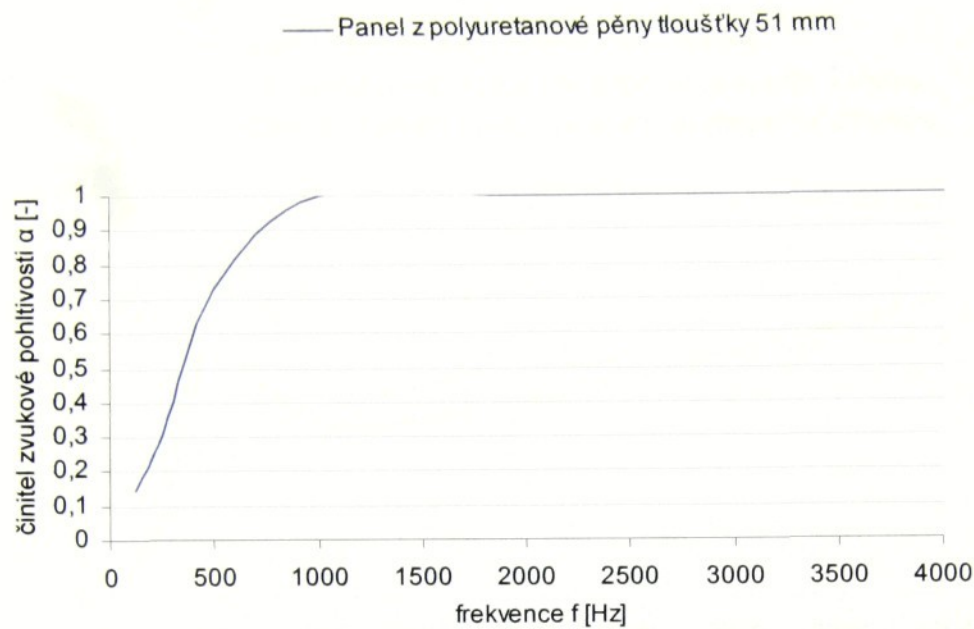
Jedná se o polyuretanovou pěnu s členitým povrchem o objemové hmotnosti $28,8 \text{ kg/m}^3$ a tloušťky 51 mm.

Aplikace: obklady kompresorů, pump, dynam, obráběcích dílen, aj.

Tab. 6: Hodnoty činitele zvukové pohltivosti α panelu z polyuretanové pěny.

Činitel zvukové pohltivosti α [-]					
Frekvence f [Hz]					
125	250	500	1000	2000	4000
0,15	0,31	0,73	1	1	1

Graf. 3: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α panelu z polyuretanové pěny tloušťky 51 mm ($28,8 \text{ kg/m}^3$).



Pěnový zvukový absorbér [8]

Jedná se o akustický prvek z polyesteruretanové pěny o objemové hmotnosti 32 kg/m^3 . Tloušťka prvku není výrobcem uvedena. U náročnějších aplikací, kde je výskyt prachu, různých olejů, vlhkosti apod., může být povrch pokryt fólií z Mylaru (polyester) nebo Tedlaru (polyvinylfluorid).

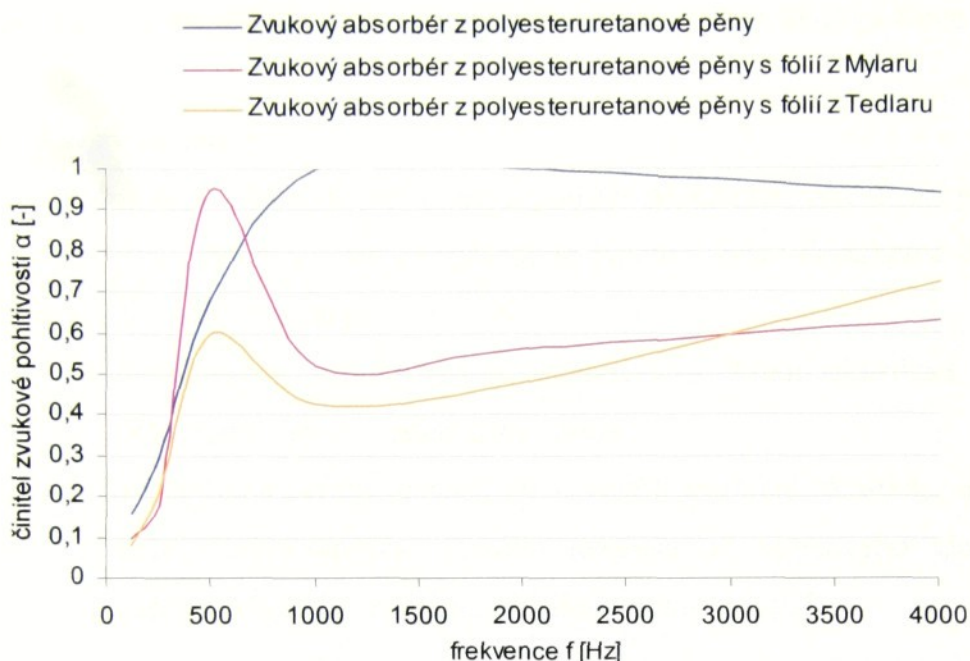
Aplikace: obklady ventilací, apod..

Obvykle se kombinuje s vinylovými materiály pro dosažení požadované zvukové neprůzvučnosti.

Tab. 7: Hodnoty činitele zvukové pohltivosti α absorbéru z polyesteruretanové pěny (č. 1), s fólií z Mylaru (č. 2), s fólií z Tedlaru (č. 3).

č.	Činitel zvukové pohltivosti α [-]					
	Frekvence f [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	0,16	0,3	0,68	1	1	0,94
2	0,1	0,18	0,95	0,52	0,56	0,63
3	0,08	0,21	0,6	0,43	0,48	0,72

Graf. 4: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α absorbérů z polyesteruretanové pěny (32 kg/m^3) na frekvenci f .



Neprůzvučné materiály a konstrukce

Materiály, které mají schopnost nepropouštět akustické vlnění označujeme jako neprůzvučné. Vyznačují se tím, že část zvukové energie se od materiálu odrazí a část je přenesena skrz materiál. Neprůzvučnost je dána zejména hmotností materiálu, tuhostí, tlumicí schopností.

V praxi se pro účely zvukové izolace s požadavky na zvukovou neprůzvučnost používají zejména minerální vláknité výrobky. Minerální vláknité výrobky zvyšují zvukovou neprůzvučnost sendvičových dílců. Snížení hladiny hluku v konstrukci souvisí s elastickými vlastnostmi minerálně vláknitých materiálů a s jejich nízkým modulem pružnosti (ve srovnání s pěnovými plasty mají nízkou dynamickou tuhost a jsou pro akustické účely mnohem vhodnější). Dalšími těžkými neprůzvučnými materiály, které se v praxi běžně využívají jsou polyvinylchloridové fólie, fólie z chlorovaného polyetylenu s minerálními plnivými a aromatickým olejem, hliníkové fólie, asfaltové tmely aj..

➤ Šíření zvuku přes materiál

Metoda izolace využívá při snižování hluku vlastnosti materiálu či konstrukce, které obecně říkáme neprůzvučnost. Na obr. 1 je znázorněno rozdělení akustické energie při dopadu

vlny na stěnu na několik částí. Energie zvukové vlny dopadající kolmo na ohybově měkkou stěnu, rozděluje dva prostory, se rozdělí na část, která bude odražena nazpět ke zdroji a na část energie pronikající za stěnu. Nyní se zabýváme složkou I_3 , která prochází za stěnu (viz. obr. 1). Přesněji řečeno bude nás zajímat energie vyzářená za stěnu do druhého prostoru.

➤ Neprůzvučnost

Schopnost dělicího prvku nepropouštět akustické vlnění nazýváme neprůzvučnost. Jestliže činitel průzvučnosti τ vynásobíme plochou stěny dostaneme celkovou průzvučnost. Rozeznáváme dva typy neprůzvučnosti:

- a) vzduchovou neprůzvučnost, sledujeme-li šíření akustické energie ze vzduchu přes stěnu opět do vzduchu za stěnou,
- b) kročejovou neprůzvučnost, sledujeme-li vyzáření akustické energie ze stěny, která byla vlivem impulsů (kroků) uvedena do ohybového vlnění. S tímto druhem neprůzvučnosti se setkáme zejména ve stavebnictví.

➤ Stupeň vzduchové neprůzvučnosti

Množství, respektive podíl akustického výkonu, který se dostává za stěnu se udává v decibelech. Akustickou kvalitu stěny vyjádříme stupněm vzduchové neprůzvučnosti R [dB], který je definován vztahem:

$$R = 10 \cdot \log(1/\tau) = 10 \cdot \log \frac{I_0}{I_3}, \quad (19)$$

kde τ [-] je činitele průzvučnosti, I_0 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] je intenzita zvuku, která na plochu dopadá a I_3 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] je intenzita zvuku vlny vyzářené za materiál celkem.

Stupeň vzduchové neprůzvučnosti je veličina kmitočtově závislá a proto musíme uvádět její spektrum. Snížení hladin hluku v důsledku neprůzvučnosti stěn bývá v praxi 10 až 50 dB, což jsou velmi vysoké hodnoty.

Nejčastější případ aplikace dělicí stěny v praxi je na obr. 2. Jestliže známe hladiny akustického tlaku ve dvou sousedních místnostech, kde L_1 [dB] je hodnota ve vysílací místnosti (naměřená v dozvukovém poli hlučné místnosti) a L_2 [dB] hodnota v přijímací místnosti ve vzdálenosti rovné $1/2$ šířky stěny, bude jejich rozdíl dán rovnicí:

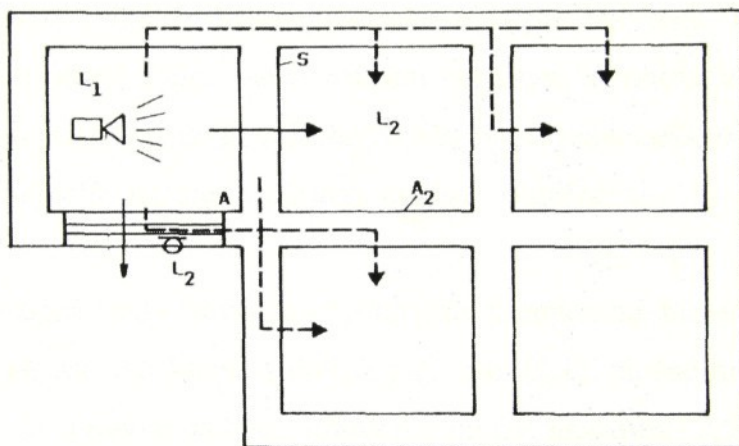
$$L_1 - L_2 = R + 10 \log \frac{A_2}{S}, \quad (20)$$

kde $S \text{ [m}^2\text{]}$ je plocha dělící stěny, $A_2 = \Sigma (a_i \cdot S_i)_2 \text{ [m}^2\text{]}$ je celková pohltivost přijímacího prostoru.

Levá strana rovnice (26) se nazývá stupeň zvukové izolace $D \text{ [dB]}$

$$D = L_1 - L_2. \quad (21)$$

Tato veličina udává výsledný zvukově-izolační efekt.



Obr. 2: Dispozice dvou místností oddělených stěnou.

➤ Některé v praxi používané neprůzvučné materiály pro zvukovou izolaci strojů

Bariéra [8]

Jedná se o transparentní ohebnou těžkou polyvinylchloridovou fólii (může být plněná síranem barnatým) o plošné hmotnosti $2,5 \text{ kg/m}^2$ nebo $4,9 \text{ kg/m}^2$. V jiném provedení je fólie vyztužená textilií ze skleněných vláken ($4,9 \text{ kg/m}^2$) nebo hliníkovou vrstvou. Tloušťky výrobků nejsou výrobcem uvedeny.

Aplikace: obklady ventilací a potrubí, obklady strojů, protihlukové clony, přepážky ve stěnách a dveřích aj.. Bariéra odolává vůči vodě, olejům, slabým kyselinám, zásadám, aj..

Tab. 8: Hodnoty vzduchové neprůzvučnosti polyvinylchloridové fólie o objemové hmotnosti 2,5 kg/m² (č. 1), 4,9 kg/m² (č. 2) a polyvinylchloridové fólie o objemové hmotnosti 4,9 kg/m² vyztužené textilií ze skleněných vláken (č. 3).

č.	Stupeň vzduchové neprůzvučnosti R [dB]					
	Frekvence f [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	11	12	15	20	26	32
2	15	19	21	28	33	37
3	15	19	21	28	33	37

Kompozitní bariéry ze skleněných vláken [8]

Jedná se o ohebné sendvičové konstrukce pro řešení náročných aplikací vyžadujících vysokou zvukovou pohltivost a redukcí činitele vzduchové neprůzvučnosti. Kompozit se skládá z těžké polyvinylchloridové fólie plněné síranem barnatým a rohože ze skleněných vláken zabalené do hliníkem pokovené textilie. Rohož může být na jedné nebo obou stranách fólie.

Aplikace: pláště strojů, obklady stěn v dílnách, obklady ventilací aj..

Tab. 9: Hodnoty stupně vzduchové neprůzvučnosti kompozitní bariéry s rohoží na jedné straně o plošné hmotnosti 2,5 kg/m² a tloušťky 25 mm (č.1), plošné hmotnosti 4,9 kg/m² a tloušťky 25 mm (č. 2), s rohoží na obou stranách o plošné hmotnosti 2,5 kg/m² a tloušťky 51 mm (č. 3), plošné hmotnosti 4,9 kg/m² a tloušťky 51 mm.

č.	Stupeň vzduchové neprůzvučnosti R [dB]					
	Frekvence f [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	6	12	17	27	38	46
2	10	16	22	30	42	49
3	7	12	18	31	46	50
4	9	14	22	35	48	53

Kompozitní bariéry z polyuretanové pěny [9]

Sendvič se skládá z polyuretanové pěny tloušťky 6,35 mm, polyvinylchloridové fólie tloušťky 2,54 mm, polyuretanové fólie s ochranou vrstvou hliníkem pokoveného materiálu Mylar (polyester) tloušťky 25,4 mm. Sendvič má objemovou hmotnost 62 kg/m³.

Aplikace: obklady stěn v dílnách, apod..

Tab. 10: Hodnoty stupně vzduchové neprůzvučnosti.

Stupeň vzduchové neprůzvučnosti R [dB]					
Frekvence f [Hz]					
125	250	500	1000	2000	4000
20	21	25	28	32	42

Tab. 11: Hodnoty činitele zvukové pohltivosti.

Činitel zvukové pohltivosti α [-]					
Frekvence f [Hz]					
125	250	500	1000	2000	4000
0,33	0,24	0,63	1	1	1

Další požadavky kladené na akustické materiály

Akustické materiály, ať už se jedná o zvukově-pohltivé nebo zvukově-izolační, by měly mít i jiné vlastnosti, které jsou v souladu s použitím výrobku. Jsou na ně kladeny požadavky zejména z hlediska:

- **tepelně-izolačních vlastností**- u některých aplikací jsou akustické materiály vystaveny vysokým teplotám,
- **navlhavosti**- vzhledem k tomu, že některé materiály udržují vlhkost, může docházet ke korozi materiálů, které jsou s tímto akustickým materiálem v těsném kontaktu,
- **předepsaného limitu rychlosti hoření**- toto hledisko souvisí především s bezpečnostními předpisy; na některé materiály se proto aplikují různé protihořlavé úpravy,
- **trvanlivosti**- zejména tam, kde jsou akustické prvky v kontaktu s různými chemikáliemi, oleji, mazivy apod.,
- **mechanické odolnosti při různých teplotách**,
- **odolnosti proti plísním**- souvisí s navlhavostí,
- **odolnosti proti UV záření**- jestliže akustický prvek má splňovat i dekorační účel, jde zejména o stálost barev popř. stálost tvarovou,
- **emisních vlastností**- jde o uvolňování různých plynů a vznik zápachu,
- **přilnavost k podložce**- jedná se o možnost přizpůsobení akustického prvku ke geometrickým parametrům kontaktního materiálu, aj..

I.1.1.3 Metody a způsoby měření zvukové pohltivosti

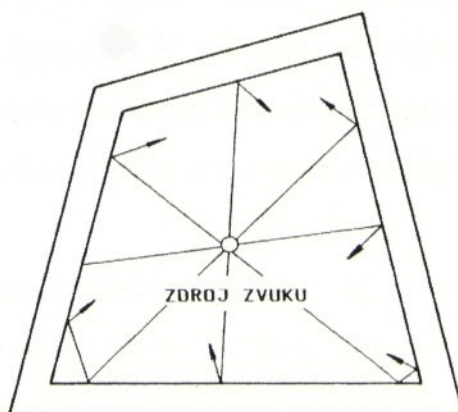
Zjišťování činitele zvukové pohltivosti α materiálů a konstrukcí pro pohlcování je prováděno podle dvou základních metod [6]:

a) metoda stojatého vlnění umožňuje zjišťovat součinitel α pouze pro kolmý dopad vln. Takto zjištěné hodnoty mají v technické praxi malý význam, neboť při umístění materiálu do uzavřeného prostoru je jeho činitel zvukové pohltivosti vlivem všesměrového dopadu zvukových vln značně odlišný.

b) metoda dozvukové komory dává nejlepší výsledky nejvíce se blížíci praxi. Činitel zvukové pohltivosti α daného materiálu se vypočte z rozdílu měřených dob dozvuku prázdné dozvukové komory, jejíž schematický náčrtek je na obr. 3, a dozvukové komory částečně obložené pohltivým materiálem. Přesný popis metody podává ČSN 730535 „Měření činitele zvukové pohltivosti v dozvukové komoře“.

➤ Měření činitele zvukové pohltivosti v dozvukové komoře [6]

Dozvukové komory jsou záměrně projektovány tak, že jednotlivé stěny nejsou paralelní, ale zato hladké a akusticky tvrdé. Také jejich objem musí být dostatečně veliký, aby se mohlo vytvořit difúzní akustické pole již od velmi nízkých kmitočtů.



Obr. 3: Dozvuková komora.

Je-li doba dozvuku prázdné komory T_1 [s] a T_2 [s] značí dobu dozvuku komory se vzorkem pohltivého materiálu, stanovíme pohltivost zkoušeného materiálu α ze vztahu:

$$\alpha = \frac{V \cdot [55,3 / c \cdot (1/T_1 - 1/T_2)] - 4 \cdot m_a}{S} + \alpha_1, \quad (22)$$

kde V [m^3] je objem dozvukové komory, c [m/s] je rychlost šíření zvuku ve vzduchu, m_a [-] je činitel útlumu vlivem absorpce zvuku ve vzduchu, S [m^2] je plocha měřeného vzorku, α_1 [-] je činitel pohltivosti prázdné komory.

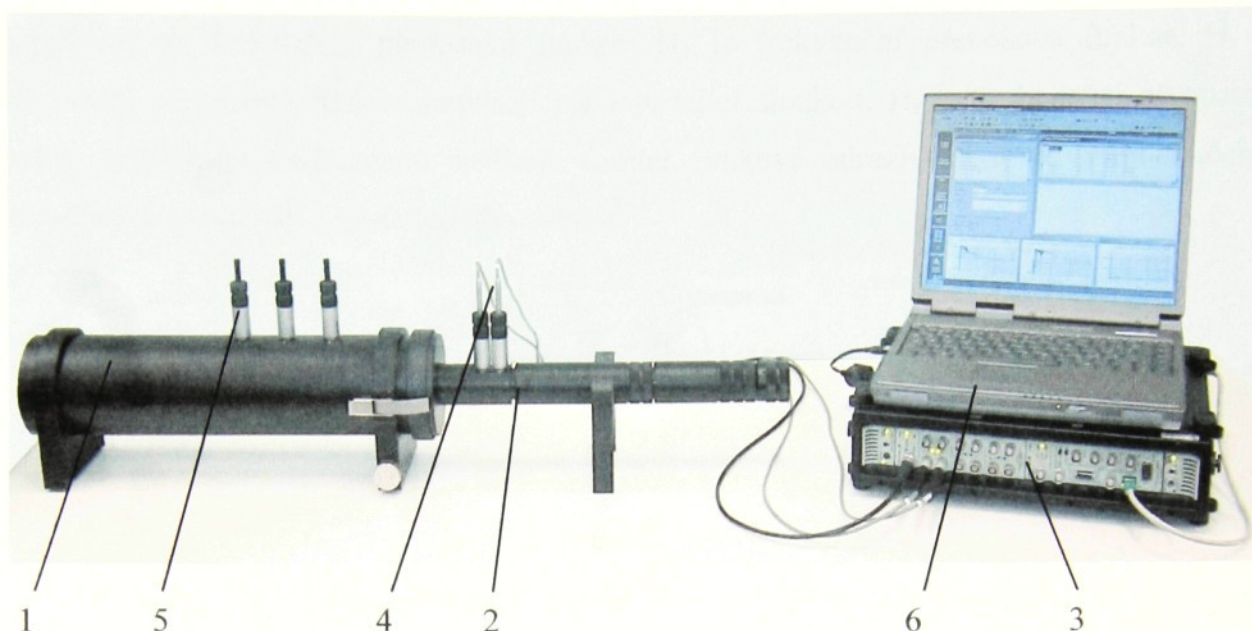
Výhodou toho způsobu měření zvukové pohltivosti α je všesměrový dopad zvuku odpovídající skutečným podmínkám. Nevýhodou je náročnost prostorového řešení měřící místnosti.

➤ **Měření činitele zvukové pohltivosti α a akustické impedance v interferometru [10]**

Princip: použije se trubice ohraničující část zvukového pole harmonické rovinné vlny dopadající kolmo na stěnu pohlcující zvuk. Aby se v trubici vytvořila rovinná podélná vlna, je třeba, aby příčný rozměr trubice byl menší než polovina vlnové délky a aby zdroj zvuku kmital „pístově“. Na opačném konci trubice, proti reproduktoru, je umístěn vzorek měřeného materiálu. Při měření lze zanedbat ztráty akustické energie při šíření trubicí, k nimž dochází na stěnách trubice v důsledku viskozity vzduchu a tepelné vodivosti stěn trubice. Trubice představuje vlnovod s jednorozměrným šířením zvukových vln. V trubici postupuje harmonická rovinná vlna z reproduktoru, dopadá na měřený vzorek a odrazí se zpět. Postupující a odražená vlna spolu interferují a vytvářejí v trubici stojaté vlnění. Stojaté vlnění vzniká nezávisle na délce, na druhu zdroje zvuku a na kmitočtu.

➤ **Dvouvibrofonová impedanční měřicí trubice [11]**

Dvouvibrofonová impedanční měřicí trubice typu 4206 a impedanční trubice typu 4206A jsou používány k měření akustických vlastností zahrnujících činitel zvukové pohltivosti α , koeficient odrazivosti a normovanou impedanci malých testovacích vzorků ve frekvenčním pásmu od 50 Hz do 6,4 kHz. Toho je dosaženo měřením dopadajících a odražených složek náhodného nebo pseudonáhodného hluku, který je generován zdrojem zvuku vnitř impedanční trubice. Na odraženou složku mají vliv akustické vlastnosti měřeného vzorku.



Obr. 4: Impedanční trubice typu 4206

1- velká nízkofrekvenční trubice, 2- malá vysokofrekvenční trubice, 3- signální analyzátor, 4- mikrofon , 5- spojka pro připojení mikrofonu, 6- počítač.

Složení dvoumikrofonové impedanční měřicí trubice typu 4206 (obr. 4):

- velká nízkofrekvenční trubice má frekvenční zátěž a zvukový zdroj na jednom konci a tři spojky pro připojení mikrofonů uvnitř trubice; velká trubice měří v pásmu frekvencí 50 Hz - 1,6 kHz a její průměr je 100 mm;
- malá vysokofrekvenční měřicí trubice se dvěma mikrofonovými spojkami připojená přímo na jednom konci velké trubice; průměr malé trubice je 29 mm a měří v pásmu frekvencí 500 Hz - 6,4 kHz;
- velký, středně velký a malý držák vzorků, každý s akusticky tvrdým zadním plátem připevněným k posuvnému pístu;
- dvě prodlužovací trubice, které mohou být umístěny mezi měřicí trubicí a držákem vzorků, ke zvětšení délky kteréhokoliv z měřících nástrojů.

Metoda dvou mikrofonů [11]

Metoda dvou mikrofonů pro měření akustického koeficientu absorpce spočívá v rozkladu širokopásmového stacionárního náhodného signálu (šumu) na dopadající a odraženou složku. Signál je generovaný zvukovým zdrojem a dopadající a odražené složky jsou určeny ze vztahu mezi akustickým tlakem měřeným pomocí mikrofonů na dvou místech stěny trubice. Z dopadajících a odražených složek tlaku zvuku na dvou místech jsou

vypočítány tři frekvenční přenosové funkce: H_1 je frekvenční přenosová funkce, H_i je frekvenční přenosová funkce související s dopadající složkou, H_r je frekvenční přenosová funkce související s odraženou složkou. Činitel zvukové odrazivosti R je pomocí těchto proměnných vypočítán z následujícího vztahu:

$$R = \left(\frac{H_1 - H_i}{H_r - H_1} \right) e^{j \cdot 2 \cdot k \cdot (l+s)}, \quad (23)$$

$$k = \frac{\omega}{c}, \quad (24)$$

kde k je vlnové číslo, l [mm] je vzdálenost mezi prvním mikrofonem a čelní plochou vzorku a s [mm] je vzdálenost mezi oběma mikrofony.

Použitím koeficientu odrazivosti může být vypočítána normovaná impedance ($z/\rho \cdot c$)- kde z je měrná akustická impedance, ρ je hustota vzduchu, c je rychlost zvuku ve vzduchu- a činitel zvukové pohltivosti α z následujících vztahů:

$$\frac{z}{\rho \cdot c} = \frac{1+R}{1-R}, \quad (25)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2. \quad (26)$$

Poznámka: činitel zvukové odrazivosti R je v kapitole I.1.1.2 označován symbolem β .

Platí, že činitel zvukové odrazivosti β je tím větší, čím více se měrná akustická impedance $z = p/v$ (kde p je akustický tlak a v je akustická rychlost) obou prostředí liší. Pro kolmý dopad zvuku platí vyjádření:

$$\beta = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}, \quad (27)$$

I.1.2 Postupy recyklace textilních odpadů

Obecně rozlišujeme textilní odpady sběrové a průmyslové. Průmyslové odpady vznikají při výrobě a zpracování a vyskytují se v jakékoli formě. Vlákennými průmyslovými odpady se rozumí textilní vlákna ve víceméně soudržných útvarech. Nit'ovými průmyslovými odpady jsou jednoduché, skané nebo krepové příze. Odstřižkovými odpady jsou kousky plošných textilií, které pocházejí například z konfekce a mají různé tvary a velikosti.

Sběrovými odpady se souhrnně označují staré obnošené výrobky ať už pletené, tkané, netkané či provaznické. Část z nich jde do bazarového prodeje (second hand), část se dále zpracovává a část zůstává odpadem, který se např. pálí nebo skládkuje.

Pro zpracování textilních odpadů se využívají především mechanické postupy, jejichž produktem je trhanina, což je vlákno, zbytky nití apod.. Dnes se setkáváme také s postupy termickými (např. aglomerace) a chemickými (např. solvolýzní techniky, depolymerace). V diplomové práci je využíváno vpichované netkané textilie, následující rešerše se proto týká výroby tohoto produktu.

I.1.2.1 Mechanické způsoby zpracování odpadů do netkaných textilií

Nejčastější postup zpracování textilních odpadů do netkaných textilií je způsob, který zahrnuje tyto operace:

Třídění: je základem pro další zpracování. Probíhá buď na místě vzniku odpadů, a sice v přádelnách či konfekcích, nebo v případě sběrových odpadů ve speciálních třídárnách. Textilní odpady třídíme podle druhu a materiálového složení, technologie jejich výroby, jemnosti, čistoty, barvy aj..

Čistění: odlučují se různé nečistoty a nežádoucí příměsi. Proces čištění probíhá na klepacích strojích, ve stupňovitých čističkách nebo cyklónech.

Sekání: se provádí mechanicky a sice pomocí rotačního nože či gilotiny.

Trhání: je operace při které se rozvlákňuje nasekaný odpad. Pro rozvlákňování vlněných hadrů a odstřižků se používají jednobubnové stroje. Pro hadry a odstřižky směsové (s obsahem syntetických vláken) a bavlněné se používají stroje vícebubnové. Před trháním je nutné hadry špikovat vodou nebo mastičím olejem společně s vodou v emulzi.

Dalšího rozvlákňování až na vlákna se u nití a nedotržků zbylých v trhanině dosahuje garnetováním, druzetováním nebo mykáním.

Po těchto operacích, jejichž produktem je rozvlákněný materiál, následuje výroba rouna (příprava vláknenné vrstvy požadované plošné hmotnosti) a následné zpevnění rouna (fixace struktury).

Způsoby přípravy rouna z trhaniny

Jednotlivé postupy přípravy rouna se liší zejména různou produktivitou a vlastnostmi vytvořeného produktu. Mezi hlavní vlastnosti patří objemnost, rovnoměrnost a orientace vláken. Obecně rozeznáváme suchý a mokrý způsob výroby rouna.

Mezi suché způsoby výroby patří způsob mykací a pneumatický.

Mykací způsob spočívá v postupném ojednocování vláken a jejich uspořádání převážně ve směru vystupující pavučiny. Toto uspořádání vláken se nazývá anizotropické. K přípravě vláknenné pavučiny se využívá mykacích strojů vyvinutých speciálně pro výrobu netkaných textilií. Běžně jsou využívány klasické mykací stroje víčkové (bavlnářské) a válcové (vlnářské). Pro svou větší šíři- 1,5 - 3,5 m a vyšší výkon jsou k přípravě vláknenné pavučiny využívány mykací stroje válcové (vlnářské). Mykací způsob se u druhotných surovin vyznačuje menší rychlostí výroby oproti mykání surovin prvotních. Dochází také k častějšímu zanášení a ucpávání částí stroje, což vyžaduje častější čištění, odsávání a filtraci. Hrubá vlákna rychleji poškozují jemné povlaky pracovních potahů.

Mykací způsob předpokládá kladení (vrstvení) pavučin do rouna. Obecně existují tři způsoby kladení:

Podélné kladení se využívá zejména k výrobě pojených textilií nízkých plošných hmotností, do 100 g/m^2 . Princip kladení spočívá v tom, že několik mykacích strojů uspořádaných za sebou podélně vrství vystupující pavučiny na jeden dopravník a tím se násobí plošná hmotnost vláknenného rouna.

Tohoto způsobu kladení je možné využít při výrobě jednoho typu studovaných akustických prvků (viz. kap. I.2).

Příčné kladení je častějším způsobem přípravy vláknenné vrstvy. Kladení pavučiny se při výrobě vláknenného rouna provádí zejména na horizontálním příčném kladeči.

Úhel křížení pavučiny v příčně vrstveném vláknenném rounu je dán rychlostí pohybu ukládacího pásu a odváděcího pásu. Plošná hmotnost vytvořeného rouna závisí na plošné hmotnosti přiváděné pavučiny, její postupné rychlosti, šířce vytvářeného rouna a rychlosti jeho odvodu. [12]

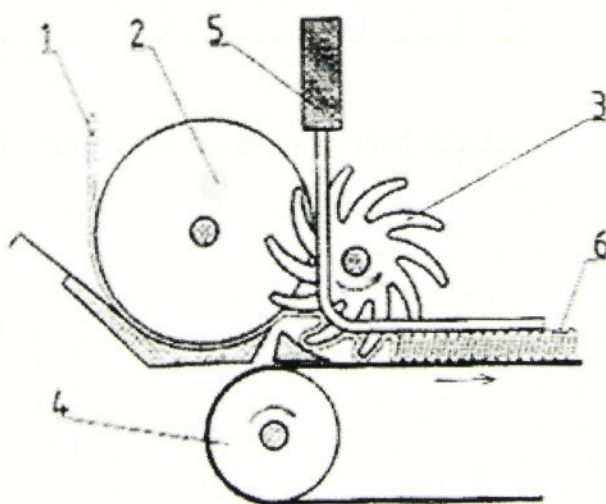
Méně používaným příčným kladečem je výkyvný horizontální kladeč (camel-back).

Kolmé kladení se využívá při přípravě vlákenné vrstvy s vyšší odolností vůči stlačení. S tloušťkou textilie, která je v podmínkách praktického použití funkcí stlačení, souvisí přímo některé její užité hodnoty jako je výplňová a měkčící schopnost, tepelně izolační vlastnosti aj.. Zvýšení odolnosti vůči stlačení se u kolmo kladených textilií dosahuje tím, že jsou vlákna ve vrstvě orientována převážně kolmo k rovině textilie. Vlákna jsou pak v průběhu stlačování namáhána spíše na vzpěr než na ohyb, na rozdíl od vrstev s převážně horizontálně uloženými vlákny. [12]

Pro výrobu kolmo kladených vrstev byla vyvinuta dvě zařízení- vibrační kolmý kladeč a rotační kolmý kladeč. V diplomové práci je uvažováno s aplikací rotačního kolmého kladeče.

➤ Rotační kolmý kladeč

Zařízením pro kolmé kladení je tzv. rotační kolmý kladeč (obr. 5). Vlákněná pavučina je přiváděna k soustavě pracovních kotoučů, jejichž hroty je formována do vlákenné vrstvy tvořené kolmými sklady. Sklady jsou snímány z hrotů soustavou drátů roštu, umístěných mezi jednotlivými pracovními kotouči. [12]



Obr. 5: Rotační kolmý kladeč.

1- pavučina z mykacího stroje, 2- podávací váleček, 3- pracovní kotouč, 4- dopravník teplovzdušné pojící komory, 5- vodící drátový rošt, 6- kolmo kladená vlákenná vrstva.

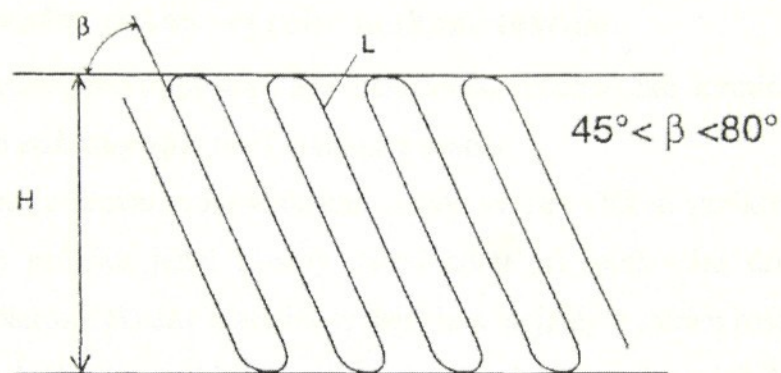
Výsledná kolmo kladená textilie má obvykle tloušťku 8 - 50 mm. Plošná hmotnost přiváděné textilie (pavučiny) bývá nejčastěji od 7 g/m² do 250 g/m². Příváděcí rychlost

textilie (pavučiny) až 100 m/min (i více). [13] Předpokladem pro výrobu akustického prvku je ovšem vyšší plošná hmotnost přiváděné textilie, resp. sendvičové vrstvy (viz. kap. I.2).

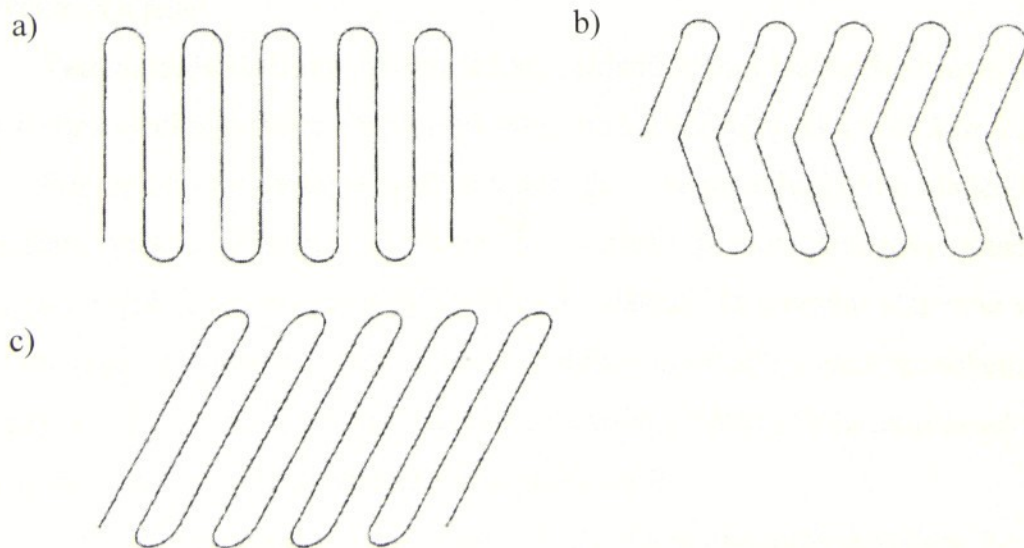
Na tomto zařízení je po určitých úpravách možné realizovat výrobu jednoho typu studovaných akustických prvků (viz. kap. I.2).

Lamelová struktura kolmo kladené netkané textilie

U lamel zohledňujeme výšku, která závisí na šířce mezery mezi dopravníkem a horním roštem. Úhel skladu lamely β z rotačního kladeče je menší než u vibračního kladení. Vrstva s menším skladem lamely je rozměrově stabilní, má vyšší podélnou pevnost lamelové struktury, ale nižší odpor proti stlačení.



Obr. 6: Struktura lamel. L- lamela, H- tloušťka, β - úhel skladu.



Obr. 7: Tvary lamel. a – svislá struktura, b – šípová struktura, c – šikmá struktura.

Pneumatický způsob se vyznačuje tím, že jsou vlákna ve vrstvě orientovaná náhodně. Z toho vyplývá menší rozdílnost vlastností rouna v jednotlivých směrech. Dochází k horšímu rozvláknění, protože nezahrnuje mykací proces. Proto je výhodné zpracovávat trhaninu o malém množství nedotržků. Každý pneumatický rounotvorný systém pracuje tak, že předem rozvolněný materiál je podáván rozvolňovacímu válci, kde jsou vlákna ojednocena a vlivem odstředivé síly a proudu vzduchu dopravena do kondenzačního prostoru (na síťový buben nebo pás), kde se ukládají a po navrstvení odvádějí k následujícímu zpracování. Na pneumatickém rounotvořiči lze jednodušeji realizovat vyšší plošné hmotnosti.

Pneumatická tvorba rouna není pro realizaci konstrukce navrhovaných akustických prvků vhodná.

Způsoby zpevnění rouna- výroba netkané textilie

Obecně rozlišujeme tři postupy zpevnění rouna: mechanické, termické a chemické.

➤ Mechanické způsoby zpevnění vlákenné vrstvy

Vpichování je provazování vlákenné vrstvy svazky vláken vzniklými přeorientací části vláken účinkem průniku jehel s ostny. Nevýhodou při vpichování druhotných surovin je zanášení jehel. Nerozvlákněný materiál se napíchne na jehly a stěrací rošt je neshodí. Dochází tak k lámání jehel. Dalším problémem je ucpávání opěrného roštu a jehelných desek prachem. Z toho vyplývá nutnost odsávání a častější čištění.

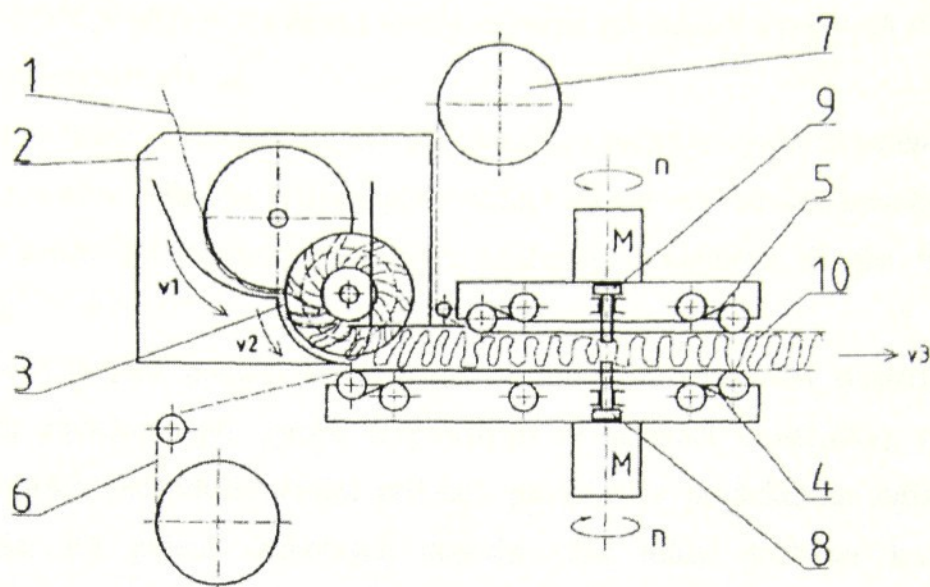
Proplétání je založeno na mechanickém provazování vlákenné vrstvy- nejčastěji rouna-soustavou vazných nití. Problémem při proplétání druhotných surovin může být praskání jazýčkových jehel.

Technologie Rotis se využívá k fixaci skladů kolmo kladeného rouna. Této techniky lze využít pro výrobu jednoho z typů studovaných akustických prvků (viz. kap. I.2).

Princip této technologie spočívá v tom, že se na povrchu kolmo kladené vlákenné vrstvy zakrucují vlákna. Zakroucení vláken je docíleno pomocí soustavy rotačních kruhových brousek, které vzájemně zaplétají vyčnívající vlákna. Na povrchu vlákenné vrstvy tak vzniká tzv. kvazi-příze, která zajišťuje soudržnost kolmých skladů. Tímto způsobem fixujeme kolmé sklady, které jsou již fixovány roztavením podílu přídatných termoplastických vláken nebo nížetajících složky v případě vláken bikomponentních.

Výhodou technologie Rotis je však použitelnost libovolných vláken, bez nutnosti použití vláken termoplastických, která jsou vhodná pro termickou fixaci kolmých skladů. V tomto případě je na povrch kolmo kladené vlákenné vrstvy z obou stran přiváděna armující textilie

(mřížka), ke které jsou pomocí soustavy brousek zaplétána vyčnávající vlákna. Princip technologie je znázorněn na obr. 8.



Obr. 8: Agregát Rotis.

1- pavučina přiváděná z mykacího stroje; 2- rotační kolmý kladeč; 3- pracovní kotouč; 4- dolní dopravník; 5- horní dopravník; 6- dolní přívod armující textilie; 7- horní přívod armující textilie; 8,9- série rotujících elementů; 10- oboustranně zpevněná kolmo kladená vlákenná vrstva.

Pavučina nebo vpichovaná textilie je k rotačnímu kolmému kladeči přiváděna rychlostí v rozmezí 10 - 120 m/min. Plošná hmotnost přiváděné textilie může být v rozmezí 7 - 250 g/m². Tloušťku výsledného produktu můžeme regulovat rychlostí pracovního kotouče rotačního kladeče a šířkou mezery mezi dolním a horním dopravníkem. Výhodou rotačního kolmému kladeče oproti vibračnímu je jednodušší regulace tloušťky a vyšší výkon. Armující textilie může být např. z polypropylénu, skla aj.. Otáčky rotujících elementů jsou regulovatelné a pohybují se okolo 2300 ot/min. Tloušťka výsledného produktu může být v rozmezí 10 - 50 mm. [13]

Vlastnosti kvazi-příze a kvalita fixace kolmých skladů jsou ovlivněny průměrem rotujícího elementu, jeho otáčkami, rychlostí pohybu vlákenné vrstvy, třecí silou mezi povrchem rotujícího elementu a povrchem vlákenné vrstvy, úhlem mezi rotujícím elementem a vlákennou vrstvou, hustotou vlákenné vrstvy, strukturou vlákenné vrstvy a materiálovými vlastnostmi jako jsou kompresní odpor, jemnost vláken, ohebnost vláken, délka vláken aj..

➤ **Termické způsoby zpevnění vlákenné vrstvy**

Podstatou procesu termického zpevňování je nanášení pojiva (prášek, pasta) na vláknou vrstvu nebo vrstvení vlákenné vrstvy s plošným pojivým materiálem (mřížka, fólie). Další možností je příprava vlákenné vrstvy ze směsi základních a pojivých vláken (níže tající nebo bikomponentní vlákna).

Pojení teplem může probíhat mezi dvěma kalandry, z nichž je vyhříván jeden nebo oba. Další možností je ohřev vlákenné vrstvy teplým vzduchem v horkovzdušné komoře. Zvýšení pojícího efektu může být docíleno následným stlačením a kalibrací dvojicí horkých či chladných válců.

Mezi výhody pojení pomocí termoplastů ve srovnání s pojením disperzemi patří ekologicky nižší závadnost při výrobě (nepoužívají se síťovací prostředky), hygienická nezávadnost výrobků, jednodušší strojní zařízení, produkce a produktivita zařízení, nižší spotřeba energie. Při pojení druhotných surovin však může docházet k uvolňování neekologických látek a pachů. Nevýhodou pojení pomocí termoplastů je vyšší náročnost mísení vláken s pojivem a nižší plocha styku vlákno-pojivo. Nevytváří se segmentová struktura.

➤ **Chemické způsoby zpevnění vlákenné vrstvy**

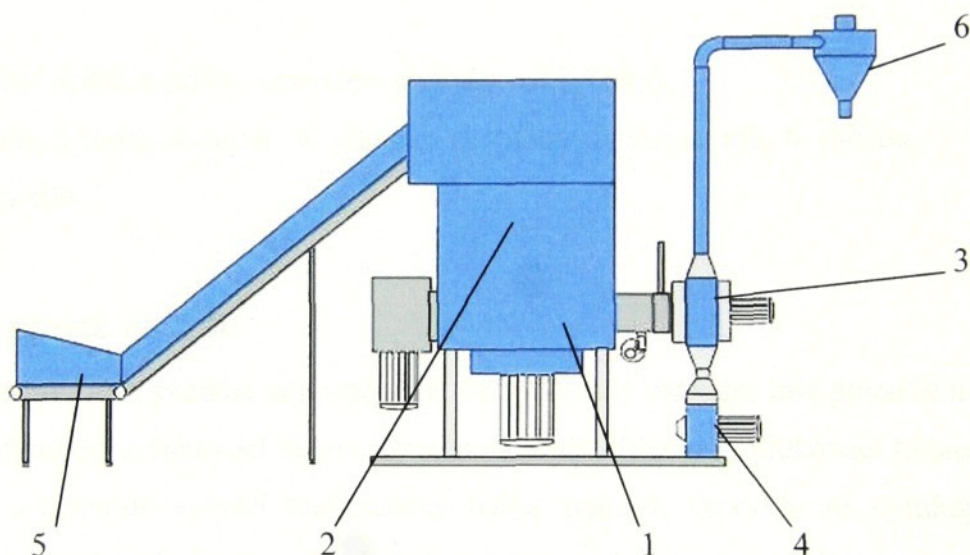
Chemický způsob spočívá v prosycení vlákenné vrstvy disperzí. Předpokladem je dobrá smáčivost povrchu vláken, což může být vzhledem k nežádoucímu povrchovému napětí druhotných surovin problém. Nutností je tedy snížení povrchového napětí mezi disperzí a vlákny. K tomuto účelu je disperze stabilizována povrchově aktivními látkami.

Pojením pomocí impregnace vzniká textilie s typickým rozložením pojiva vůči vláknům, které se nazývá segmentová struktura. Segmentová struktura vede ke značné fixaci úseků vláken, které se pak nemohou při malých zatíženích přeskupovat. Znamená to vyšší ohybovou tuhost a hodnotu počátečního modulu v tahu impregnovaných textilií. Ohebnost do značné míry závisí na deformovatelnosti pojiva. [12] Nevýhodou je velká spotřeba energie na sušení v případě výroby „tlustých“ výrobků.

I.1.2.2 Termické způsoby zpracování odpadu plastů do fólií

Pro snížení velikosti a dosažení vyšší hustoty odpadového termoplastického materiálu určeného k dalšímu zpracování se využívá proces aglomerace. Navazuje na proces mletí odpadu. Redukce velikosti odpadového materiálu se provádí z důvodů lepšího uskladnění,

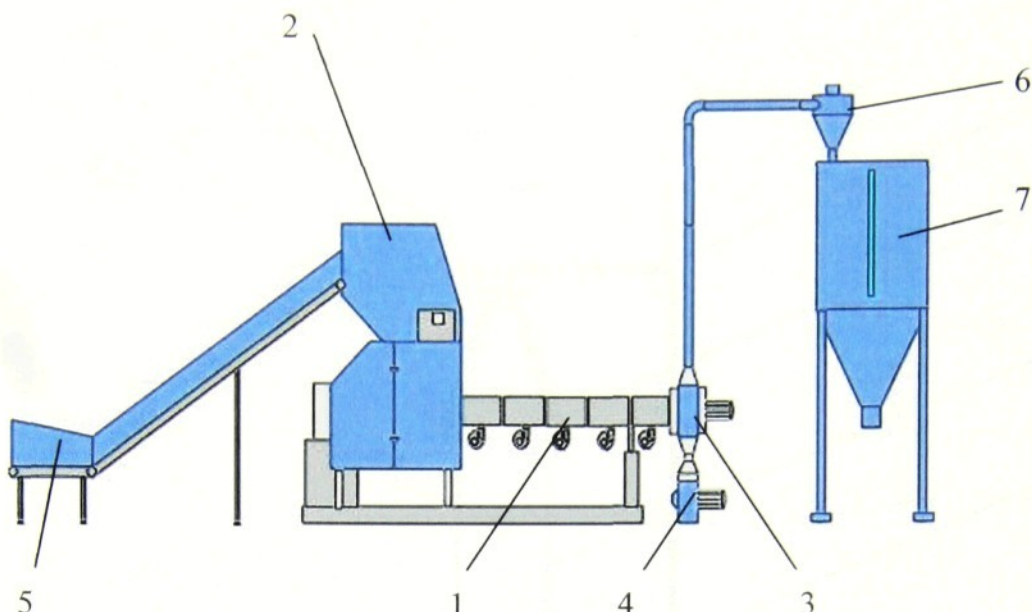
zpracování na menších strojích a lepší manipulace v dalších výrobních procesech. Aglomerace je proces předzpracování termoplastických materiálů teplem, prudkým ochlazením a konečným sekáním na malé kusy [14]. Rozemletý materiál (PAD, PES, POP, PE apod.) je přiváděn do statoru s rychle se otáčejícím kotoučem. Ohřátý vzduch a vzájemné tření mezi syntetickými vlákny způsobují jejich roztavení. Tavenina vytéká ze statoru vlivem odstředivé síly a za pomoci odsávání. Materiál se dále pomocí extrudéru vytlačuje a po vychlazení se zpracovává na tzv. aglomerát. Aglomerát je neopracovaný, hrubý materiál nepravidelného tvaru, který obsahuje vzduch a při vlastním dloužení praská. Proto následuje proces vytlačování a regranulace [14].



Obr. 9: Recyklační linka (aglomerátor- extrudér- granulovací systém).

1- tavící extrudér, 2- aglomerátor, 3- sekáč, 4- chladicí ventilátor, 5- dopravník, 6- cyklón.

Proces vytlačování a granulace je využíván k homogenizaci regenerovaného polymeru, čímž vzniká vhodný materiál pro další zpracování. Aglomerát je přiváděn do mlýnu, kde se rozemele a dále putuje do extrudéru s vytápěným šnekem, který má po své délce různé parametry. Postupně tak taveninu stlačuje a uvolňuje, čímž dochází k uvolňování vzduchu z taveniny. Tavenina je vytlačována přes trysky a vznikající struny jsou ochlazeny vzduchem nebo ve vodní lázni. Struny se sekají na granule, které putují do uskladňovacího sila. Jinou možností je, že se tavenina z extrudéru vytlačuje přímo na substrát (podkladovou textilií).



Obr. 10: Recyklační linka (mlýn- extrudér- granulovací systém).

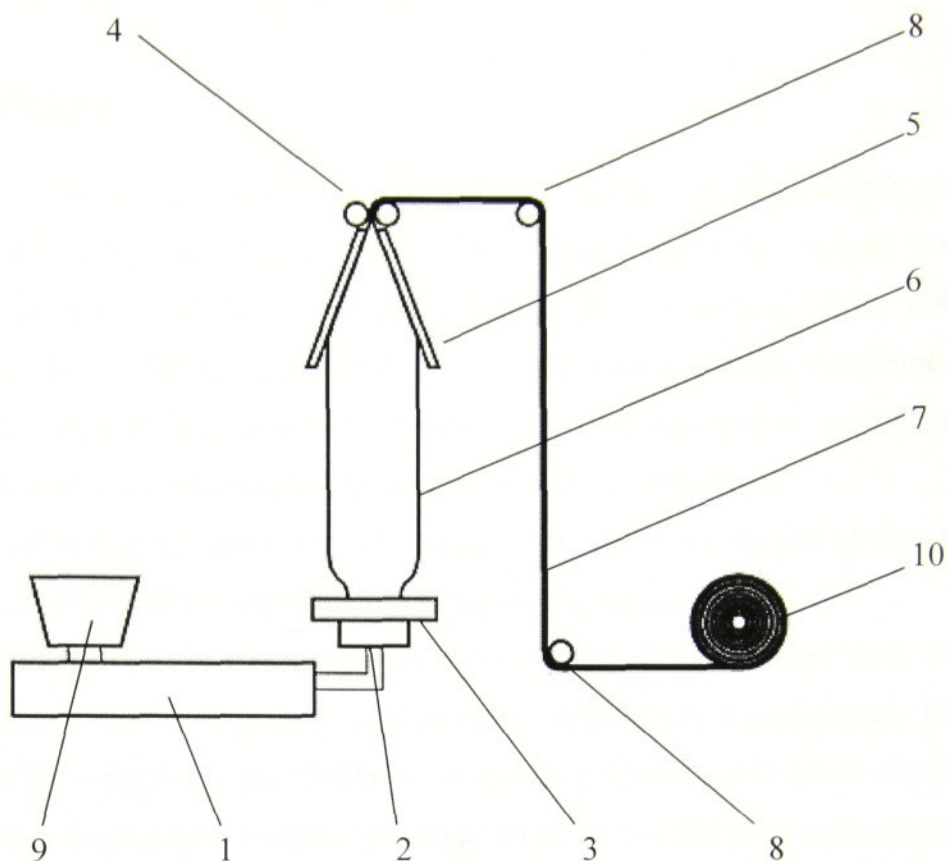
1- tavící extrudér, 2-mlýn, 3- sekáč, 4- chladicí ventilátor, 5- dopravník, 6- cyklón, 7- uskladňovací silo.

Zpracování plastů do fólií

Zpracování do fólií probíhá nejčastěji tak, že vyhřívaný extrudér taví granulát a dávkuje vznikající taveninu do vyfukovací hubice tvaru mezikruží. Středem vyfukovací hubice proudí vzduch, který z taveniny vytváří tenkostěnný balón (rukáv). Obvykle se vyfukuje zdola nahoru, tzn. ve vertikálním směru. Na konci vyfukovací hubice je chladicí prstenec, který prudkým vzduchem chladí nahoru postupující balón do té doby, než je sevřen odtahovacími válci. Válce zploští balón a vznikne tak fólie, která pomocí vodících válečků putuje dolů z „vyfukovací věže” [15].

Zploštělá kruhová fólie se může po stranách rozříznout a jako dvouvrstvá navíjet na cívku. Jiná možnost je, jak je tomu u výroby pytlů, že se fólie po své šíři zataví a dále seká nebo perforuje. Tyto operace mohou probíhat buďto přímo na vyfukovací lince nebo později na lince pytlovací a balící.

Průměr nafouklého balónu dosahuje obvykle 1,5 až 4 násobku průměru vyfukovací hubice. Chlazením horkého balónu vzduchem dochází k redukci tloušťky jeho stěn, což je jednoduše kontrolováno a ovlivňováno měnícím se objemem vzduchu v balónu a odtahovou rychlostí. To dává vyfukované fólii, oproti tradiční spouštěné či extrudované fólii odtahované pouze ve směru vytlačování, vyrovnané izotropické vlastnosti. [15]



Obr. 11: Schéma procesu vyfukování do fólie.

1- tavící extrudér, 2- vyfukovací hubice, 3- vzduchový prstenec, 4- odtahovací svírací válce, 5- rozpínací konstrukce, 6- balón (rukáv), 7- fólie, 8- vodící válečky, 9- zásobník granulí, 10- nábal fólie.

Nejběžněji užívanými materiály pro vyfukování do fólií jsou polyetylény (HDPE, LDPE, LLDPE). Do polyetylénu se podle přání zákazníka přidávají různá aditiva, barviva aj.. Je také možné vyrobit fólii s různou barvou nebo druhem materiálu uvnitř a vně rukávu nebo s různým materiálem v jádru a obalu fólie (např. recyklát obalený z obou stran primárním polyetylénem).

Vyfukovaná fólie, ať už ve formě rukávu nebo formě vrstvy má mnoho využití. Typická aplikace je v zemědělství (fóliovníky, zahradní a skleníkové fólie, silážní fólie aj.), v potravinářství (potravinářské smršťovací fólie, laminování hliníku nebo papíru pro balení mléka či kávy, bariérové obaly proti unikání aroma aj.), ve stavebnictví, pro balení spotřebního zboží, pro sběr komunálního odpadu aj..

Takto vyrobená fólie je využita v konstrukci zvukově-izolačního prvku.

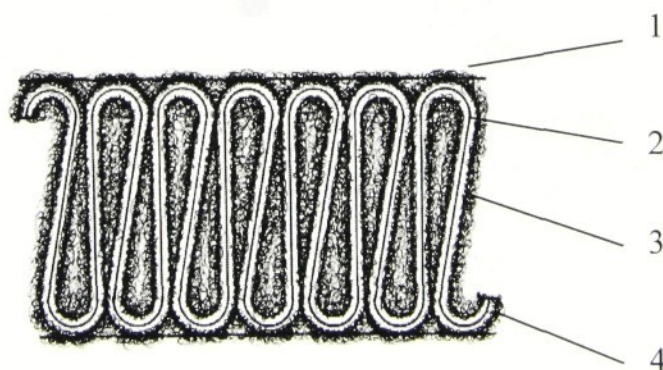
I.2 Návrh akustického prvku

I.2.1 Konstrukce

Pro tento experiment byly navrženy dvě odlišné konstrukce akustických prvků. Základem každé konstrukce je sendvičová vrstva skládající ze dvou vrstev netkané textilie, mezi kterými je fólie (tzn. NT/fólie/NT). Konstrukčně rozdílné akustické prvky získáme při jejich výrobě tak, že v jednom případě bude sendvičová vrstva kladena vertikálně (viz. obr. 12) a v druhém případě horizontálně (viz. obr. 13). Aby tyto prvky byly akusticky souměřitelné, musí mít stejnou nebo alespoň podobnou objemovou hmotnost.

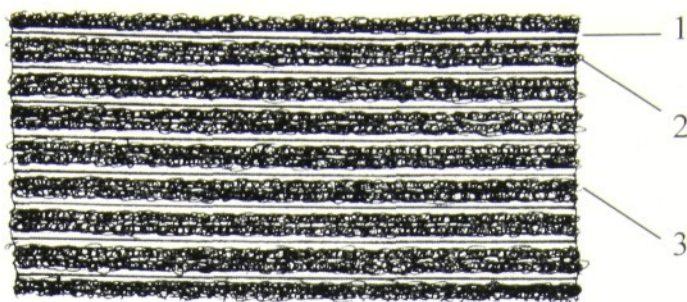
Akustické prvky budou vyrobeny ve dvou tloušťkách. Bude tak možné sledovat vliv tloušťky, resp. plošné hmotnosti na akustické vlastnosti navrhovaných prvků.

Dále bude sledován vliv tepelné úpravy prvků na jejich akustické vlastnosti. Vrstvy netkané textilie budou k fólii připevněny vpichováním, čímž dojde k perforování fólie a ke vzniku velmi malých otvorů. Lze předpokládat, že tepelnou úpravou při teplotě tání fólie a následném vychladnutí dojde po ke zhutnění produktu a tím ke zvýšení jeho celkové tuhosti. Dále můžeme předpokládat, že se tepelnou úpravou otvory ve fólii rozšíří. Bude tak možné posoudit vliv přítomnosti fólie a vliv tepelné úpravy na akustické vlastnosti produktu.



Obr. 12: Schéma akustického prvku vertikální konstrukce.

1- armovací skleněná mřížka a kvazi-příze, 2- fólie z recyklovaného polymeru, 3- vrstva netkané textilie, 4- vrstva netkané textilie.



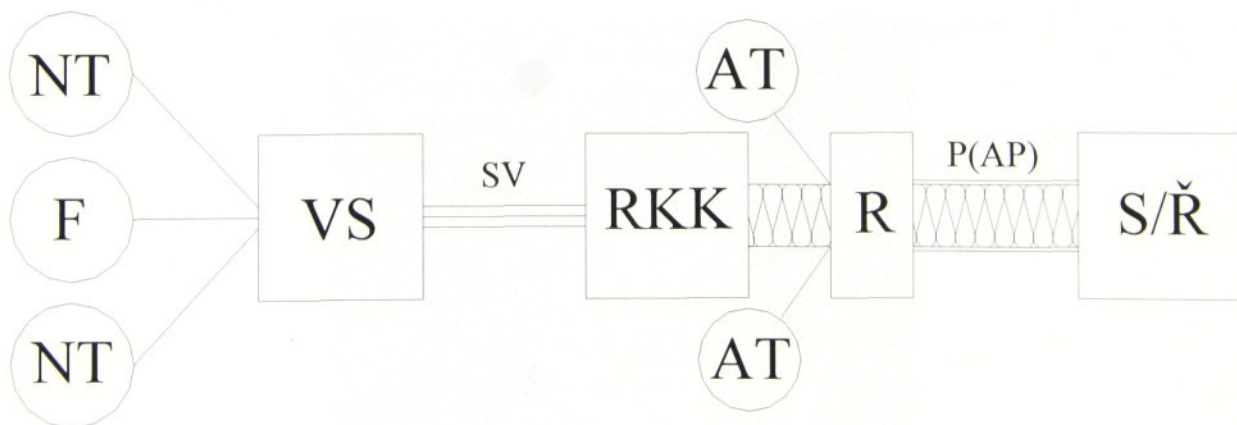
Obr. 13: Schéma akustického prvku horizontální konstrukce (8x sendvič NT/fólie/NT).

1- fólie z recyklovaného polymeru, 2- vrstva netkané textilie, 3- vrstva netkané textilie.

I.2.2 Výrobní postup

Z recyklovaného textilního odpadu- trhaniny- budou vpichováním (viz. kap. I.1.2.1) vyrobeny dvě netkané textilie lišící se materiálovým složením.

Výroba akustického prvku vertikální konstrukce by v praxi probíhala podle následujícího schématu (viz. obr. 14):

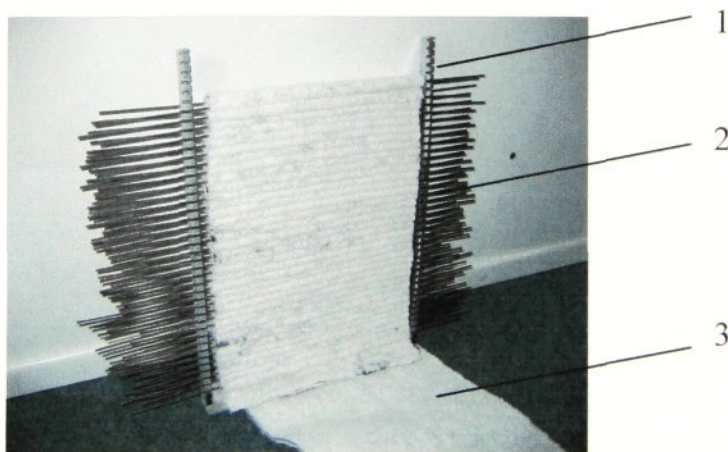


Obr. 14: Schéma výrobního postupu akustického prvku vertikální konstrukce.

NT- netkaná textilie, F- fólie, VS- vpichovací stroj, SV- sendvičová vrstva, RKK- rotační kolmý kladeč, AT- armující textilie, R- Rotis, P (AP)- produkt (akustický prvek), S/Ř- sekání, resp. řezání.

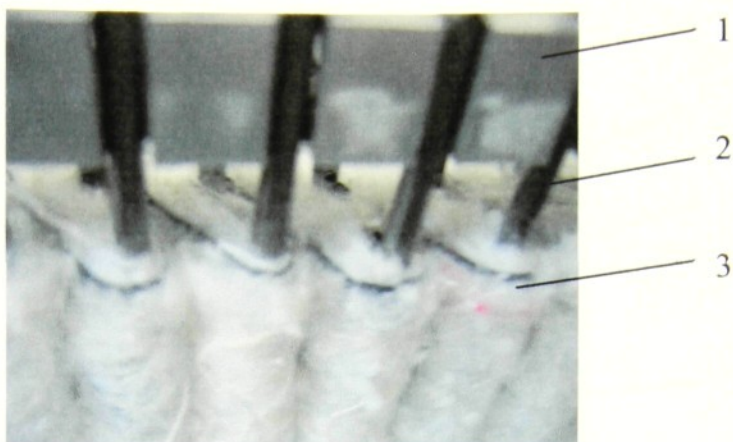
Nejprve je zajištěna soudržnost netkaných textilií a fólie pomocí vpichování (viz. kap. I.1.2.1), kde dochází k perforování fólie a prostupu vláken jednotlivými vrstvami. Soudržná sendvičová vrstva je následně od vpichovacího stroje vedena k rotačnímu kolmému kladeči, kde vzniká kolmo kladená textilie. K oběma povrchům kolmo kladené textilie je poté přiváděna armující textilie (mřížka), která je k ní připevněna pomocí technologie Rotis (viz. kap. I.1.2.1). Produktem je akustický prvek vertikální konstrukce, který je dále sekán, nebo řezán na požadovanou velikost..

V našem případě je soudržná vpichovaná sendvičová vrstva kolmo kladena ručně na laboratorním přípravku (viz. obr. 15 a obr. 16). Princip výroby na tomto přípravku spočívá v postupném kladení sendvičové vrstvy mezi kovovými jehlicemi, které jsou uchyceny na kovovém skeletu. Jehlice jsou od sebe odsazeny tak, aby se docílilo požadovaného tvaru kolmých skladů. Dostatečného zpevnění kolmo kladené sendvičové vrstvy je docíleno pomocí armovací textilie a hlavice s rotačním frikčním elementem (viz. obr. 17 a kap. I.1.2.1). Kolmo kladená sendvičová vrstva je ponechána na přípravku a pomocí zmíněné hlavice je k ní z obou stran připevněna armovací textilie (mřížka). Tato textilie zajišťuje vedle fixace kolmých skladů také celkovou tuhost výrobku. K výrobě akustických prvků jsou k dispozici dva přípravky pro výrobu prvků dvou různých tloušťek (15 a 30 mm), resp. plošných hmotností.



Obr. 15: Laboratorní ruční kolmý kladeč.

1- kovový skelet, 2- kovové jehlice, 3- kolmo kladená sendvičová vrstva (netkaná textilie/ fólie/ netkaná textilie).



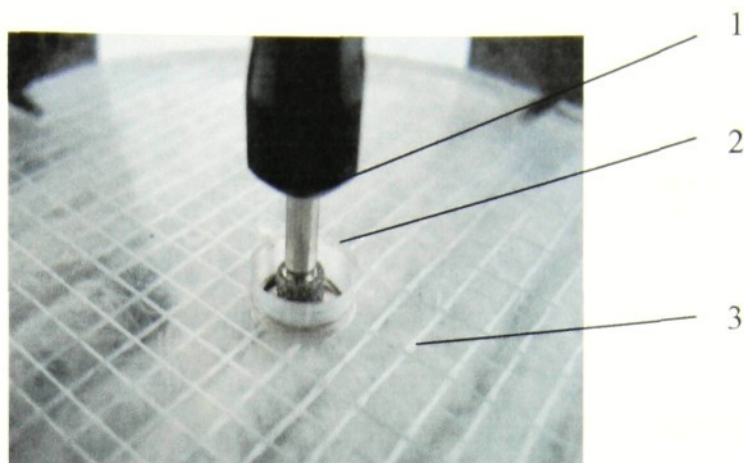
Obr. 16: Detail kolmých skladů na laboratorním kolmém kladeči.

1- kovový skelet, 2- kovové jehlice, 3- kolmo kladená sendvičová vrstva (netkaná textilie/ fólie/ netkaná textilie).



Obr. 17: Fixace struktury na přípravku.

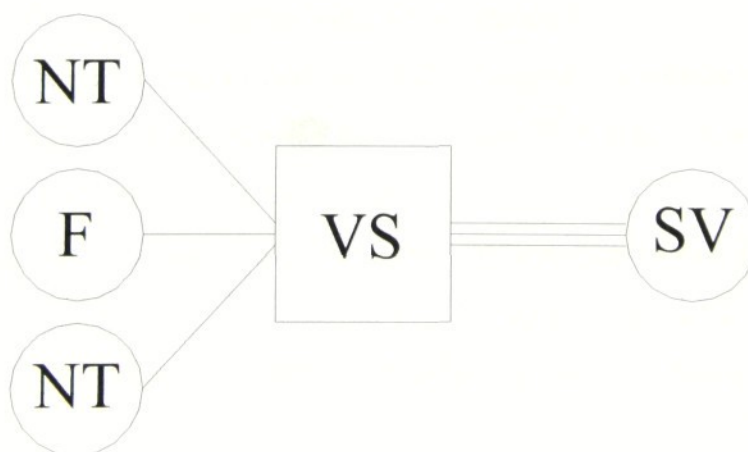
1- laboratorní hlavice s rotačním frikčním elementem, 2- laboratorní ruční kolmý kladeč, 3- kolmo kladený sendvič (netkaná textilie/fólie/netkaná textilie) a armovací textilie, resp. vznikající akustický prvek.



Obr. 18: Detail hlavičky s rotujícím brouskem.

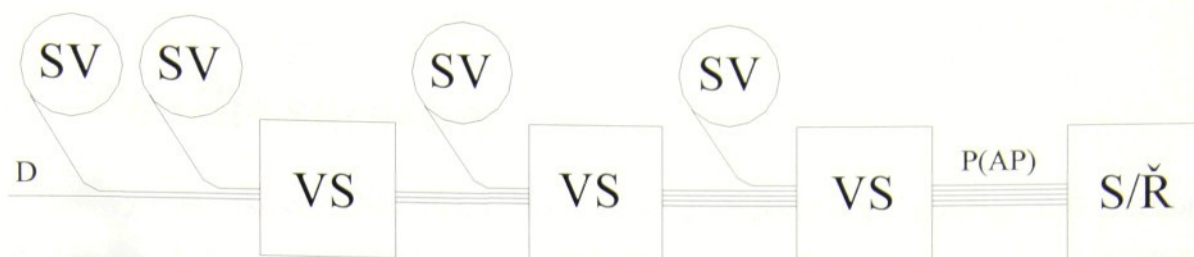
1- rotační element s rotačním brouskem, 2- přitlačné plexisklo, 3- kolmo kladený sendvič (netkaná textilie/ fólie/ netkaná textilie) a armovací textilie, resp. vznikající akustický prvek.

Výroba akustického prvku horizontální konstrukce by v praxi probíhala podle následujících schémat (obr. 19 a obr. 20):



Obr. 19: Schéma výrobního postupu akustického prvku horizontální konstrukce- výroba sendvičové vrstvy. NT- netkaná textilie, F- fólie, VS- vpichovací stroj, SV- nábal sendvičové vrstvy.

Nejprve je zajištěna soudržnost netkaných textilií a fólie pomocí vpichování (viz. obr. 19). Vzniká tak soudržná vpichovaná sendvičová vrstva (NT/fólie/NT), která je navíjena.



Obr. 20: Schéma výrobního postupu akustického prvku horizontální konstrukce. SV- nábal sendvičové vrstvy, VS- vpichovací stroj, P (AP)- produkt (akustický prvek), S/Ř- sekání, resp. řezání, D- dopravník.

Z jednotlivých nábalů jsou sendvičové vrstvy na sebe podélně vrstveny a následně vpichovány postupně jedna k druhé. Každý vpichovací stroj tak přidá ke vstupujícímu polotovaru pouze jednu sendvičovou vrstvu (viz. obr. 20). V lince je pak tolik vpichovacích strojů, kolik má akustický prvek sendvičových vrstev minus jedna. Má-li tedy mít akustický prvek např. osm sendvičových vrstev, musí být v lince sedm vpichovacích strojů. Je ale také možná výroba diskontinuální a potom stačí jeden vpichovací stroj. Výrobek pak projde strojem tolikrát, kolik obsahuje sendvičových vrstev minus 1.

Příčné kladení není v tomto případě vhodné. Vzhledem k velkým plošným hmotnostem výrobku by docházelo k lámání jehel. Proto se jednotlivé sendvičové vrstvy musí k sobě vpichovat postupně, tzn. postupně jedna k druhé.

V našem případě, při laboratorní výrobě, jsou na sebe naskládány připravené sendvičové vrstvy a jejich soudržnost je ručně zajištěna pomocí vpichovacích jehel. Jsou tak vyrobeny akustické prvky podobných plošných hmotností jako u prvků konstrukce vertikální.

I.2.3 Testování

Vzhledem k technickému vybavení Technické univerzity v Liberci jsou akustické prvky testovány pouze na zvukovou pohltivost. Činitel zvukové pohltivosti je měřen pomocí impedanční měřicí trubice (viz. kap. I.1.1.3.).

II EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

II.1 Použité suroviny

Pro výrobu akustického bloku byly v tomto experimentu použity dvě různorodé vpichované netkané textilie (bílá a barevná) a dvě odlišné fólie (černá a červená). Netkané textilie i fólie byly vyrobeny z druhotných surovin neznámého původu, a proto u nich byla provedena kvalitativní analýza.

II.1.1 Netkaná textilie

Kvalitativní analýza materiálu vpichovaných netkaných textilií (recyklovaného textilního odpadu) byla provedena pomocí spalovací zkoušky, mikroskopie a rozpustnosti vláken v některých rozpouštědlech. V „barevné“ netkané textilii byla nalezena vlákna polyesterová, vlněná, polyakrylonitrilová a nitě vlněné, bavlněné, polyesterové, polyamidové, viskóзовé a polyakrylonitrilové. V „bílé“ netkané textilii byla nalezena vlákna bavlněná, vlněná, polyesterová, polyakrylonitrilová a viskóзовá.

Plošné hmotnosti a tloušťky vzorků „barevné“ a „bílé“ netkané textilie jsou uvedeny v příloze 1 (tab.1 a tab. 2). Střední hodnoty těchto parametrů jsou uvedeny v tab. 12.

II.1.2 Fólie

Kvalitativní analýza fólií z druhotných surovin byla provedena metodou diferenční skenovací kalorimetrie (DSC). Zjistilo se, že obě fólie jsou vyrobeny z recyklovaného polyetylenu a vzájemně se liší teplotou tání, přidavkem aditiv, barvou aj.. Červená fólie vykazovala jeden peak odpovídající teplotě tání $t_f = 109,619\text{ }^{\circ}\text{C}$ (viz. příloha 2, tab. 1). Černá fólie vykazovala na grafickém záznamu z DSC dva vrcholy teploty tání, z čehož je patrné, že se jedná o polyetylen s přidavkem aditiva (viz. příloha 2, tab. 2) Vyšší peak vykazoval teplotu tání $t_f = 122,444\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Plošné hmotnosti a tloušťky vzorků červené a černé polyetylenové fólie jsou uvedeny v příloze 1 (tab.3 a tab. 4). Střední hodnoty těchto parametrů jsou uvedeny v tab. 12.

Materiály použité v experimentu jsou uvedeny v tabulce 12.

Tab. 12: Použité materiály pro výrobu akustických prvků.

č.	Použité materiály	Plošná hmotnost [g/m ²]	Tloušťka [mm]	Materiálové složení	Poznámka
1	netkaná textilie	113	1,21	vlákna: vl, PES, PAN nitě: vl, ba, PES, PAD, VS, PAN	barevná
2	netkaná textilie	214	1,9	vlákna: vl, ba, PES, PAN, VS	bílá
3	fólie	200	0,92	POE	červená
4	fólie	70	0,1	POE	černá
5	armovací textilie	30	0,17	sklo	mřížka

Příklady označení složení resp. konstrukce akustických prvků:

51315V- vertikálně konstruovaný akustický prvek (viz. obr. 12) se skládá z očíslovaných materiálů viz. tab. 12, postupně od vrchu dolů: armovací textilie (5)- sendvičová vrstva skládající se postupně od vrchu dolů z barevné netkané textilie (1), červené fólie (3), barevné netkané textilie (1)- armovací textilie (5). V- vertikální konstrukce.

52425VT- vertikálně konstruovaný akustický prvek (viz obr. 12) se skládá z očíslovaných materiálů viz. tab. 12, postupně od vrchu dolů: armovací textilie (5)- sendvičová vrstva skládající se postupně od vrchu dolů z bílé netkané textilie (2), černé fólie (4), bílé netkané textilie (2)- armovací textilie (5). VT- vertikálně konstrukce s tepelnou úpravou.

8 x 131H- horizontálně konstruovaný akustický prvek (viz. obr. 13) se skládá z očíslovaných materiálů viz. tab. 12, postupně od vrchu dolů: barevná netkaná textilie (1)- červená fólie (3)- barevná netkaná textilie (1)- barevná netkaná textilie (1)- červená fólie (3)...atd. (osm horizontálně kladených sendvičových vrstev složených postupně z barevné netkané textilie červené fólie- barevné netkaná textilie. H- horizontální konstrukce.

4 x 242HT- horizontálně konstruovaný akustický prvek skládající se ze čtyř horizontálně kladených sendvičových vrstev složených z bílé netkané textilie (2)- černé fólie (4)- bílé netkané textilie (2). HT- horizontální konstrukce a tepelná úprava.

Akustické prvky jiného složení se značí analogicky, jak lze nalézt v tab. 13.

II.2 Výroba vzorků akustického prvku

Výrobní postup akustických prvků je uveden v kap. I.2.2. Tepelná úprava vybraných akustických prvků byla provedena v teplovzdušné pojící komoře s horizontálním pásem. Teplota pojící komory byla nastavena podle teploty tání příslušných fólií (viz. kap. II.1.2).

Při těchto teplotách však fólie v akustických prvcích nezměnily svůj charakter ani po delší době. Obě fólie začaly ve všech případech tát až při 135 °C. Čas ohřevu byl nakonec 15 minut. Při kratších časech nedocházelo k dostatečnému ohřátí sendvičové vrstvy a tím k tání fólií, což bylo nejspíš zapříčiněno nízkou tepelnou vodivostí akustického prvku.

Z každého akustického materiálu bylo na vertikální pile vyříznuto několik vzorků průměru 100 mm, což odpovídá průměru velké impedanční trubice, která měří v pásmu frekvencí 50 Hz - 1,6 kHz. Vzorky o průměru 29 mm pro měření na malé impedanční trubici, tzn. pro měření pásma frekvencí 500 Hz - 6,4 kHz, nebylo možné z technických důvodů zhotovit. Ovšem vzhledem k tomu, že absorpční schopnosti vláknenných vrstev ve vyšším pásmu frekvencí jsou obecně známe a jsou „dobré“, zaměřili jsme se na měření zvukové pohltivosti při frekvencích nižších. Pro experiment byly připraveny vzorky akustických prvků viz. tab. 1 v příloze 3. Střední hodnoty vzorků akustických prvků jsou v tab. 13.

Tab. 13: Střední hodnoty parametrů vzorků akustických prvků- $\overline{m}_p$ [g/m²] značí střední hodnotu plošné hmotnosti vzorků, $\overline{m}_o$ [kg/m³] značí střední hodnotu objemové hmotnosti vzorků, $\overline{t}$ [mm] značí střední hodnotu tloušťky vzorků, s je směrodatná odchylka a v je variační koeficient.

Složení	$\overline{m}_p$ [g/m ²]	s_p [g/m ²]	v_p [%]	$\overline{m}_o$ [kg/m ³]	s_o [kg/m ³]	v_o [%]	$\overline{t}$ [mm]	s_t [mm]	v_t [%]
51315V	1901,37	96,18	5,06	124,11	7,18	5,79	15,33	0,52	3,39
51315V	3323,16	154,63	4,65	104,6	6,11	5,84	31,8	1,1	3,46
4 x 131H	1778,29	29,4	1,65	108,94	3,3	3,03	16,33	0,58	3,55
8 x 131H	3503,96	95,45	2,72	110,93	3,51	3,16	31,6	0,9	2,82
52425V	1885,99	130,99	6,95	114,22	5,15	4,51	16,5	0,54	3,27
52425V	3102,46	109,43	3,53	104,05	4,46	4,28	29,83	0,75	2,51
4 x 242H	1913	80,11	4,19	91,1	3,82	4,19	21	0	0
6 x 242H	2871,16	78,14	2,72	89,72	2,44	2,72	32	0	0
51315VT	1731,61	112,45	6,49	126,8	2,6	2,05	13,67	1,03	7,54
51315VT	3327,4	124,14	3,73	123,24	4,6	3,73	27	0	0
4 x 131HT	2003,23	74,61	3,72	133,55	4,97	3,73	15	0	0
8 x 131HT	3746,51	82,76	2,21	125,95	2,87	2,28	29,75	0,5	1,68
52425VT	1602,16	60,49	3,78	114,44	4,32	3,78	14	0	0
52425VT	3292,6	154	4,68	120,14	2,86	2,38	27,4	0,9	3,25
4 x 242HT	1801,63	33,69	1,87	92,44	2,51	2,71	19,5	0,58	2,97
6 x 242HT	2832,96	135,75	4,79	88,53	2,68	3,03	32	1,16	3,63

II.3 Měření zvukové pohltivosti α

Pro každé konkrétní měření v pásmu frekvencí 50 Hz - 1,6 kHz bylo získáno několik set hodnot činitelů zvukové pohltivosti α . Výsledky jsou proto zpracované ve formě grafů (viz. grafy 5 - 32 a grafy 1 - 17 v příloze 5). V praxi se pro dobrý přehled (viz. tab. 4 - 7) uvádějí naměřené hodnoty činitele zvukové pohltivosti α v závislosti na frekvenci f v oktávách. Vzhledem k tomu, že měření zvukové pohltivosti α je měřeno v pásmu frekvencí 50 Hz - 1,6 kHz, není nejvyšší hodnota frekvence, ke které jsou uváděny hodnoty činitele zvukové pohltivosti α v tab. 14 a tab. 1 v příloze 4, o oktávu vyšší k hodnotě předešlé, ale poslední hodnotou vyšetřovaného pásma frekvencí. Naměřené hodnoty součinitele zvukové pohltivosti α vzorků akustických prvků jsou v závislosti na frekvenci f uvedeny v tab. 1 v příloze 4. V tab. 14 jsou uvedeny jejich střední hodnoty.

Tab. 14: Střední hodnoty tloušťky a činitelů zvukové pohltivosti α . Kde $\bar{t}$ [mm] je střední hodnota tloušťky vzorků, $\bar{\alpha}$ [-] značí střední hodnotu naměřených hodnot činitelů zvukové pohltivosti α , s [-] je směrodatná odchylka a v [-] je variační koeficient.

Složení	$\bar{t}$ [mm]	$\bar{\alpha}$ [-], s [-], v [%]	Frekvence f [Hz]				
			125	250	500	1000	1600
51315V	15,33	$\bar{\alpha}$	0,02	0,053	0,137	0,408	0,719
		s	0,003	0,006	0,02	0,056	0,06
		v	15	11,321	14,599	13,726	8,345
51315V	31,8	$\bar{\alpha}$	0,045	0,145	0,396	0,864	0,993
		s	0,003	0,011	0,02	0,019	0,007
		v	6,667	7,586	5,051	2,199	0,705
4 x 131H	16,33	$\bar{\alpha}$	0,035	0,073	0,259	0,67	0,869
		s	0,002	0,002	0,007	0,014	0,011
		v	5,714	2,74	2,703	2,09	1,266
8 x 131H	31,6	$\bar{\alpha}$	0,092	0,205	0,657	0,742	0,723
		s	0,013	0,025	0,052	0,04	0,01
		v	14,13	12,195	7,915	5,391	1,383
52425V	16,5	$\bar{\alpha}$	0,024	0,065	0,187	0,542	0,835
		s	0,002	0,006	0,018	0,047	0,027
		v	8,333	9,231	9,626	8,672	3,234
52425V	29,83	$\bar{\alpha}$	0,058	0,183	0,458	0,864	0,925
		s	0,007	0,019	0,041	0,012	0,013
		v	12,069	10,383	8,952	1,389	1,405

Pokračování tabulky 14:

Složení	$\bar{t}$ [mm]	$\bar{\alpha}$ [-], s [-], v [%]	Frekvence f [Hz]				
			125	250	500	1000	1600
4 x 242H	21	$\bar{\alpha}$	0,044	0,106	0,344	0,783	0,945
		s	0,001	0,003	0,009	0,009	0,012
		v	2,273	2,83	2,616	1,149	1,27
6 x 242H	32	$\bar{\alpha}$	0,087	0,193	0,633	0,86	0,848
		s	0,002	0,016	0,019	0,013	0,009
		v	2,299	8,29	3,002	1,118	1,512
51315VT	13,67	$\bar{\alpha}$	0,017	0,04	0,093	0,256	0,488
		s	0,001	0,003	0,008	0,022	0,034
		v	5,88	7,5	8,602	8,594	6,967
51315VT	27	$\bar{\alpha}$	0,033	0,099	0,285	0,699	0,949
		s	0,002	0,008	0,021	0,034	0,012
		v	6,061	8,081	7,368	4,864	1,265
4 x 131HT	15	$\bar{\alpha}$	0,035	0,073	0,259	0,67	0,869
		s	0,002	0,002	0,007	0,014	0,011
		v	5,714	2,74	2,703	2,09	1,266
8 x 131HT	29,75	$\bar{\alpha}$	0,091	0,198	0,528	0,603	0,652
		s	0,007	0,016	0,032	0,022	0,015
		v	7,692	8,081	6,061	3,648	2,301
52425VT	14	$\bar{\alpha}$	0,02	0,046	0,121	0,361	0,646
		s	0,001	0,002	0,005	0,015	0,02
		v	5	4,348	4,132	4,155	3,096
52425VT	27,4	$\bar{\alpha}$	0,057	0,172	0,391	0,825	0,898
		s	0,007	0,023	0,035	0,014	0,012
		v	12,281	13,372	8,951	1,697	1,336
4 x 242HT	19,5	$\bar{\alpha}$	0,031	0,069	0,239	0,614	0,879
		s	0,001	0,006	0,014	0,028	0,021
		v	3,226	8,696	5,858	4,56	2,389
6 x 242HT	32	$\bar{\alpha}$	0,069	0,143	0,545	0,835	0,87
		s	0,01	0,017	0,042	0,039	0,047
		v	14,493	11,888	7,706	4,671	5,402

III DISKUSE

Od experimentu se očekává, že ukáže jaký vliv má měrná hmotnost, tloušťka, použitý materiál (netkaná textilie, fólie), struktura a tepelná úprava akustického prvku na hodnoty činitele zvukové pohltivosti α .

Pro vyhodnocení experimentu jsou k dispozici výsledky měření uvedené v tab.1 v příloze 4 a výsledky zpracované ve formě grafů (viz. grafy 5- 32 a grafy 1- 17 v příloze 5).

Grafy 5 - 8 zobrazují, jaký vliv má tepelná úprava vertikálně konstruovaného akustického prvku a v něm obsažené vpichované perforované fólie na činitel zvukové pohltivosti α . Pro porovnání byly vybrány vzorky s tepelnou úpravou a bez tepelné úpravy o blízké objemové hmotnosti. Z porovnání vyplývá, že vzorky bez tepelné úpravy mají téměř v celém rozsahu frekvencí vyšší hodnoty činitele zvukové pohltivosti α než vzorky tepelně upravené. Zanedbatelné rozdíly jsou patrné v grafu 8, kde vzorek č. 32 složení 52425V dosahuje podobných hodnot jako tepelně upravený vzorek č. 71 složení 52425VT.

Z experimentu vyplývá, že tepelná úprava vertikálně konstruovaných prvků má významný vliv na studované akustické vlastnosti- snižuje α . Příčinou menší zvukové pohltivosti α tepelně upravených vzorků mohou být rozšířené otvory ve fólii a vyšší tuhost produktu. Ačkoli vlákna a fólie orientovaná ve směru šířící se vlny podle studie [7] nevykazují rezonanční efekt (viz. kap. I.1.1.2), lze předpokládat, že na ohybech lamel, tzn. na ploškách kolmých k postupu vlny, k jistému rozkmitávání dochází.

Grafy 9 - 12 porovnávají vertikálně konstruované akustické vzorky z rozdílných materiálů. Pro porovnání byly opět vybrány vzorky o blízké objemové hmotnosti. Z grafů 9 a 10, kde se porovnávají vzorky menších tloušťek (vzorky vyrobené na přípravku pro tloušťky 15 mm), je vidět, že akustický vzorek č. 21 složení 52425V má stejně jako tepelně upravený vzorek č. 64 složení 52425VT v celém rozsahu frekvencí větší hodnotu součinitele zvukové pohltivosti α než vzorek č. 3 složení 51315V, resp. prvek č. 46 složení 51315VT. Menší rozdíly lze nalézt pouze při nízkých frekvencích měřeného pásma. Grafy 11 a 12 porovnávají vzorky větších tloušťek (vzorky vyrobené na přípravku pro tloušťky 30 mm), ukazují, že vzorky č. 32 složení 52425V a č. 67 složení 52425VT mají oproti vzorkům č. 11 složení 51315V a č. 48 složení 51315VT vyšší hodnoty součinitele zvukové pohltivosti α pouze po určitou hodnotu frekvence.

Z experimentu vyplývá, že použitý materiál (poměr netkaná textilie/ fólie) pro výrobu akustických prvků vertikální konstrukce má významný vliv na studované akustické vlastnosti. Na větší hodnoty zvukové pohltivosti α prvků 52425V a 52425VT má

nejspíše vliv větší plošná hmotnost netkané textilie, tj. větší množství vláken, která se rozkmitávají a menší plošná hmotnost fólie. Tento argument však není potvrzen při vyšších frekvencích měřeného pásma u vzorků větších tloušťek.

Grafy 13 - 16 porovnávají vertikálně konstruované akustické vzorky podobných objemových hmotností ale různých tloušťek. Z těchto závislostí je patrné, že činitel zvukové pohltivosti α vzorků větších tloušťek narůstá v závislosti na frekvenci rychleji a dosahuje větších hodnot než u vzorků tloušťek menších.

Je potvrzeno obecné tvrzení (viz. kap. I.1.1.2), že tloušťka je důležitý parametr ovlivňující studované akustické vlastnosti.

Grafy 17- 20 zobrazují, jaký vliv má tepelná úprava horizontálně konstruovaného akustického prvku a v něm obsažené vpichováním perforované fólie na činitel zvukové pohltivosti α . Pro porovnání byly vybrány vzorky s tepelnou úpravou a bez tepelné úpravy podobné objemové hmotnosti. Z těchto závislostí vyplývá, že vzorky menších i větších tloušťek bez tepelné úpravy mají téměř v celém rozsahu frekvencí vyšší hodnoty činitele zvukové pohltivosti α než vzorky s tepelnou úpravou. Pouze v grafu 20 dosahuje tepelně upravený vzorek č. 76 složení 6 x 242HT při vyšších frekvencích měřeného pásma vyšších hodnot součinitele zvukové pohltivosti α než vzorek č. 38 složení 6 x 242H.

Z experimentu vyplývá, že tepelná úprava horizontálně konstruovaných prvků má významný vliv na studované akustické vlastnosti- snižuje α . Příčinou menší zvukové pohltivosti α tepelně upravených vzorků mohou být rozšířené otvory ve fólii a větší tuhost produktu. Můžeme vyvodit, že oproti prvkům bez tepelné úpravy nedochází u prvků s tepelnou úpravou k takovému rozkmitávání materiálu a následným přeměnám akustické energie na teplo.

Grafy 21 - 24 porovnávají horizontálně konstruovaných akustických prvků z rozdílných materiálů. Pro porovnání byly opět vybrány vzorky o podobné objemové hmotnosti. Z grafů 21 a 22, kde se porovnávají vzorky menších tloušťek, je vidět, že akustické prvky složení 4 x 242H a 4 x 242HT (jak s tepelnou úpravou, tak bez ní) mají v celém rozsahu frekvencí větší hodnoty součinitele zvukové pohltivosti α než prvky složení 4 x 131H a 4 x 131HT. Graf 23, kde se porovnávají vzorky větších tloušťek, ukazuje, že vzorek složení 6 x 242H má oproti vzorku 8 x 131H vyšší hodnoty součinitele zvukové pohltivosti pouze pro určité hodnoty frekvence. Graf 24 ukazuje, že tepelně upravený vzorek 6 x 242HT dosahuje blízkých hodnot jako tepelně upravený vzorek 8x 131HT při nižších frekvencích, zatímco při středních a vyšších frekvencích měřeného pásma dosahuje hodnot vyšších.

Z experimentu vyplývá, že použitý materiál (poměr netkaná textilie/ fólie) pro výrobu akustických prvků horizontální konstrukce má významný vliv na studované akustické vlastnosti stejně jako u vzorků vertikální konstrukce. U prvků 4 x 242H a 4 x 242HT má na větší hodnoty zvukové pohltivosti α vliv pravděpodobně větší plošná hmotnost netkané textilie a menší plošná hmotnost fólie, tzn. větší poměr netkaná textilie/ fólie oproti prvkům 4 x 131H a 4 x 131 HT. Tento argument však není zcela potvrzen u vzorků větších tloušťek.

Grafy 25 - 28 porovnávají horizontálně konstruované akustické vzorky stejného složení, podobných objemových hmotností ale různých tloušťek. Z grafů 25 a 26, je patrné, že činitel zvukové pohltivosti vzorků větších tloušťek bez ohledu na složení dosahuje větších hodnot pouze při nižších a středních frekvencích měřeného pásma. Grafy 27 a 28 ukazují, že tepelně upravené vzorky větších tloušťek dosahují v celém rozsahu frekvencí větších hodnot. Na konci měřeného pásma se však hodnoty tepelně upravených vzorků menších tloušťek hodnotám vzorků tloušťek větších přibližují a dosahují podobných hodnot.

Opět je potvrzeno obecné tvrzení (viz. kap. I.1.1.2), že tloušťka je důležitý parametr ovlivňující studované akustické vlastnosti.

Grafy 29 - 32 porovnávají akustické prvky rozdílné konstrukce (vertikální a horizontální). Z grafů 29 a 30 vyplývá, že akustické prvky horizontální konstrukce nižších tloušťek mají oproti vertikálně konstruovaným prvkům menších tloušťek v celém pásmu frekvencí vyšší hodnoty činitele zvukové pohltivosti α . Vzorky horizontální konstrukce vyšších tloušťek dosahují oproti vzorkům vertikální konstrukce větších tloušťek vyšších hodnot pouze při nižších a středních frekvencích měřeného pásma.

Z experimentu vyplývá, že konstrukce akustického prvku, má významný vliv na jeho akustické vlastnosti. Z větší části se tak potvrdila studie [7] o orientaci a struktuře vláknenných materiálů (viz. kap. I.1.1.2). V akustických prvcích horizontální konstrukce dochází k většímu rozkmitávání vláken a fólie, než u prvků vertikální konstrukce. To je zapříčiněno orientací vláken a fólie kolmo na směr šíření podélné zvukové vlny. Dochází tak k většímu přeměňování zvukové energie na energii kinetickou a následně na teplo, a tím se zvyšuje hodnota činitele zvukové pohltivosti α .

Příloha 5 obsahuje grafy 1- 16 zobrazující statistické vyhodnocení činitelů zvukové pohltivosti α vzorků vertikální a horizontální konstrukce. Jsou zde zobrazeny grafické závislosti střední hodnoty činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustických prvků a jejich dolní a horní meze, které jsou prezentovány 95% intervalem spolehlivosti. K vyhodnocení byl použit počítačový program Microsoft Excel. Úzké intervaly spolehlivosti výsledků ukazují

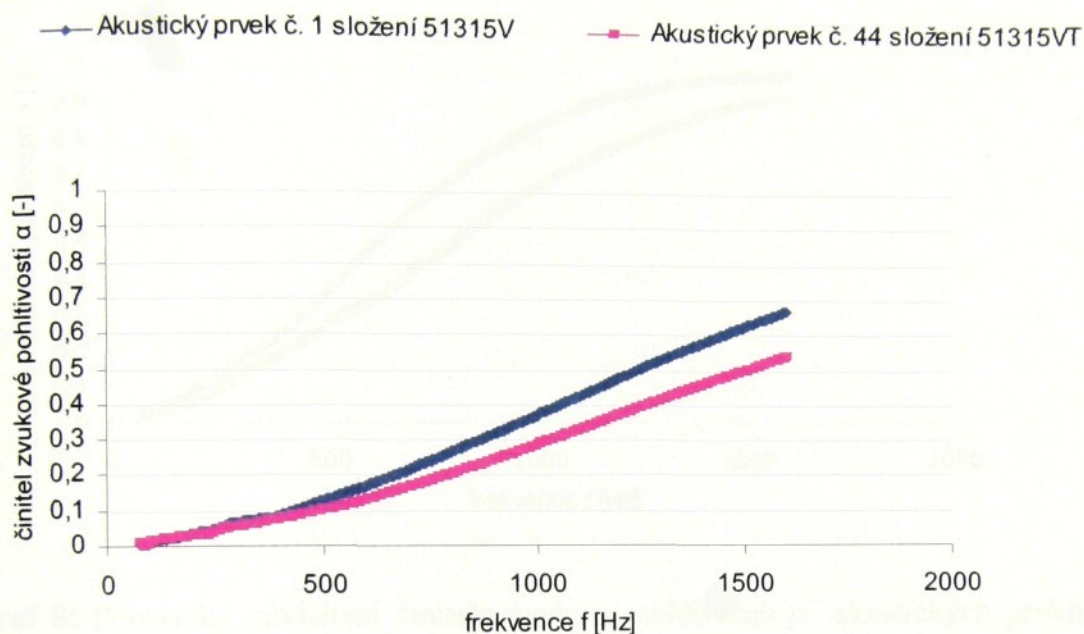
na kvalitu provedeného experimentu. Graf 17 zobrazuje statistické vyhodnocení změny činitele zvukové pohltivosti α pro třicetkrát opakované měření na jednom vzorku. Je zde zobrazena střední hodnota, minimální a maximální hodnota, dolní a horní mez (prezentovaná 95% intervalem spolehlivosti) v závislosti na frekvenci f . Úzké intervaly výsledků ukazují na přesnost měřicího zařízení, tj. dvoumikrofonové impedanční trubice. Hodnoty činitele zvukové pohltivosti α v závislosti na frekvenci f byly pro toto statistické vyhodnocení poskytnuty Katedrou strojů průmyslové dopravy Fakulty strojní. Ačkoliv měření probíhalo na jiném vzorku, než námi prověřovaném, můžeme výsledky považovat za reprezentativní.



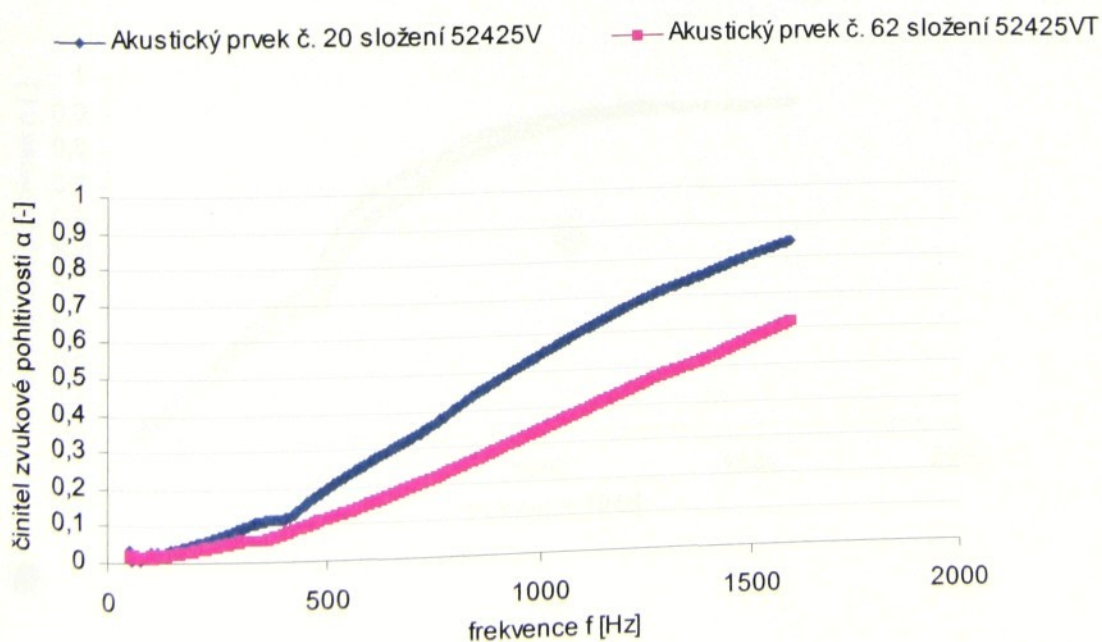
Graf 17: Statistické vyhodnocení změny činitele zvukové pohltivosti α v závislosti na frekvenci f pro třicetkrát opakované měření na jednom vzorku. Je zde zobrazena střední hodnota, minimální a maximální hodnota, dolní a horní mez (prezentovaná 95% intervalem spolehlivosti) v závislosti na frekvenci f . Úzké intervaly výsledků ukazují na přesnost měřicího zařízení, tj. dvoumikrofonové impedanční trubice. Hodnoty činitele zvukové pohltivosti α v závislosti na frekvenci f byly pro toto statistické vyhodnocení poskytnuty Katedrou strojů průmyslové dopravy Fakulty strojní. Ačkoliv měření probíhalo na jiném vzorku, než námi prověřovaném, můžeme výsledky považovat za reprezentativní.

Grafické porovnání vertikálně konstruovaných akustických prvků s tepelnou úpravou a bez tepelné úpravy

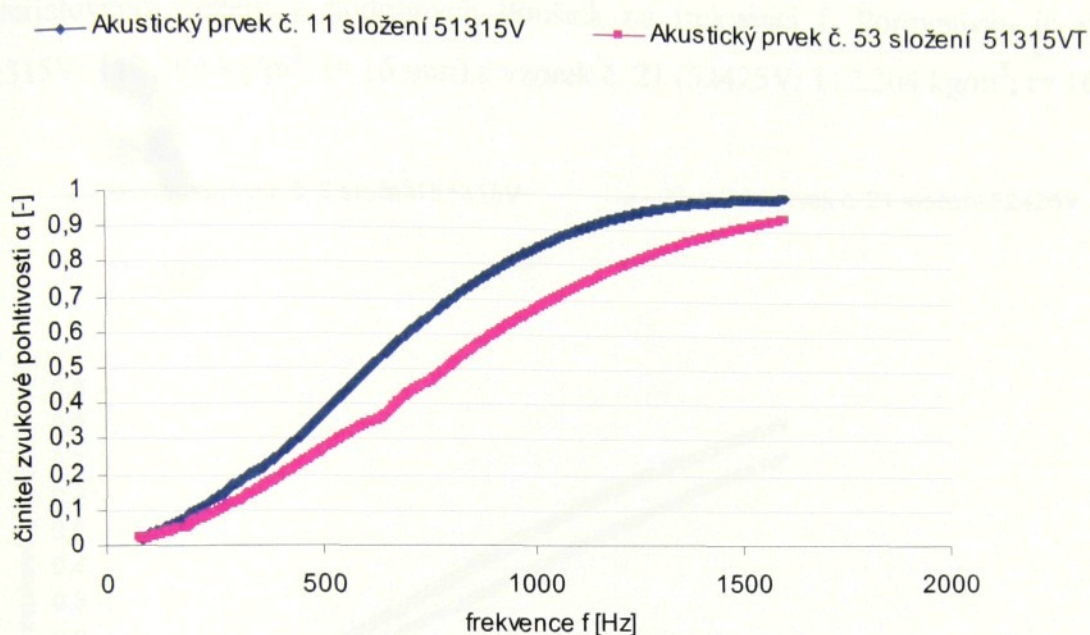
Graf 5: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků bez tepelné úpravy a s tepelnou úpravou na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 1 (51315V; 127,324 kg/m³; $t=15$ mm) a tepelně upravený vzorek č. 44 (51315VT; 127,324 kg/m³; $t=15$ mm).



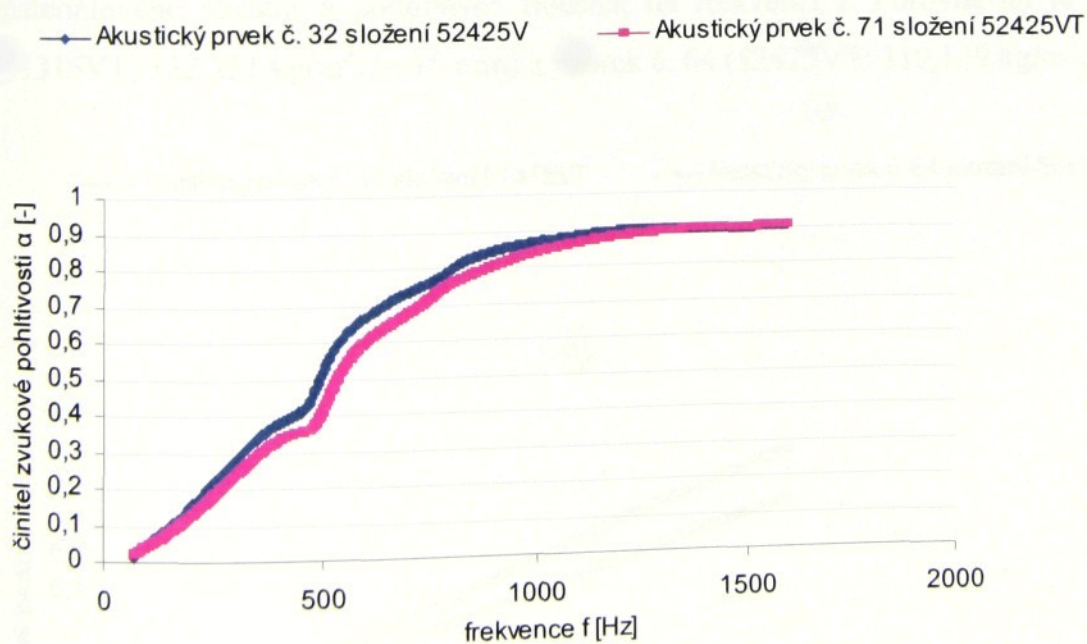
Graf 6: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků bez tepelné úpravy a s tepelnou úpravou na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 20 (52425V; 111,596 kg/m³; $t=17$ mm) a tepelně upravený vzorek č. 62 (52425VT; 111,863 kg/m³; $t=14$ mm).



Graf 7: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků bez tepelné úpravy a s tepelnou úpravou na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 11 (51315V; 111,196 kg/m³; t = 30 mm) a tepelně upravený vzorek č. 53 (51315VT; 116,949 kg/m³; t = 27 mm).

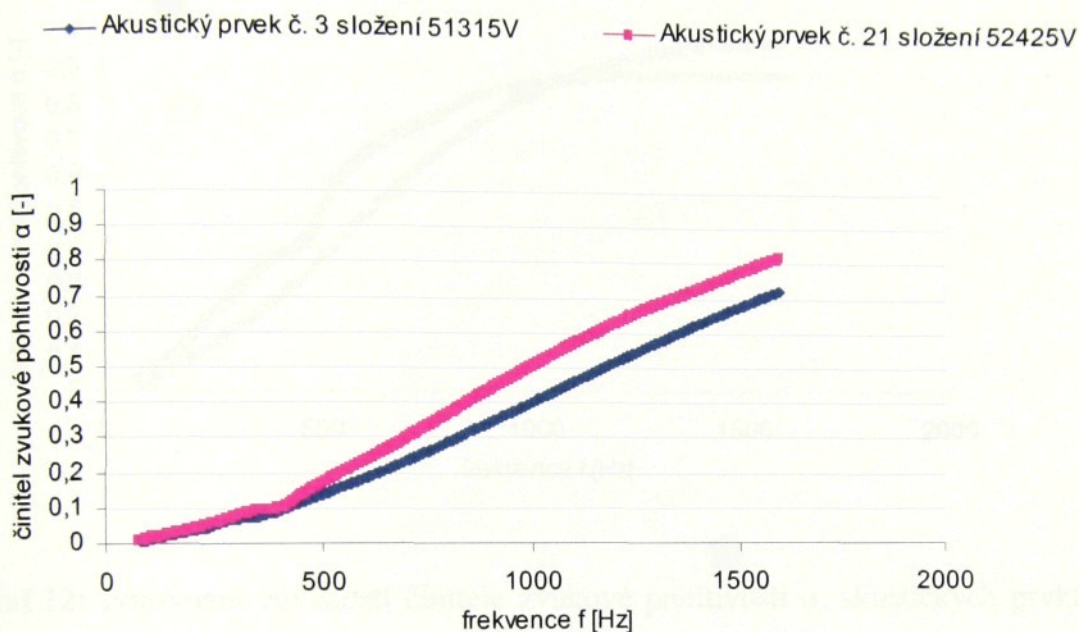


Graf 8: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků bez tepelné úpravy a s tepelnou úpravou na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 32 (52425V; 111,518 kg/m³; t = 29 mm) a tepelně upravený vzorek č. 71 (52425VT; 117,775 kg/m³; t = 28mm).

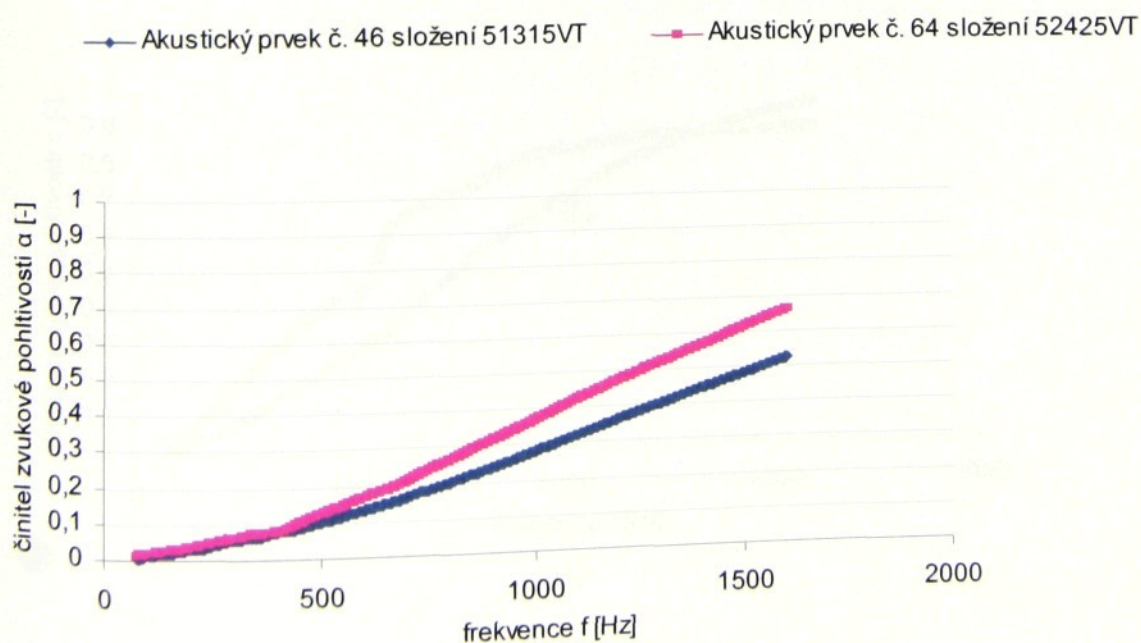


Grafické porovnání vertikálně konstruovaných akustických prvků rozdílného materiálového složení a podobných tloušťek

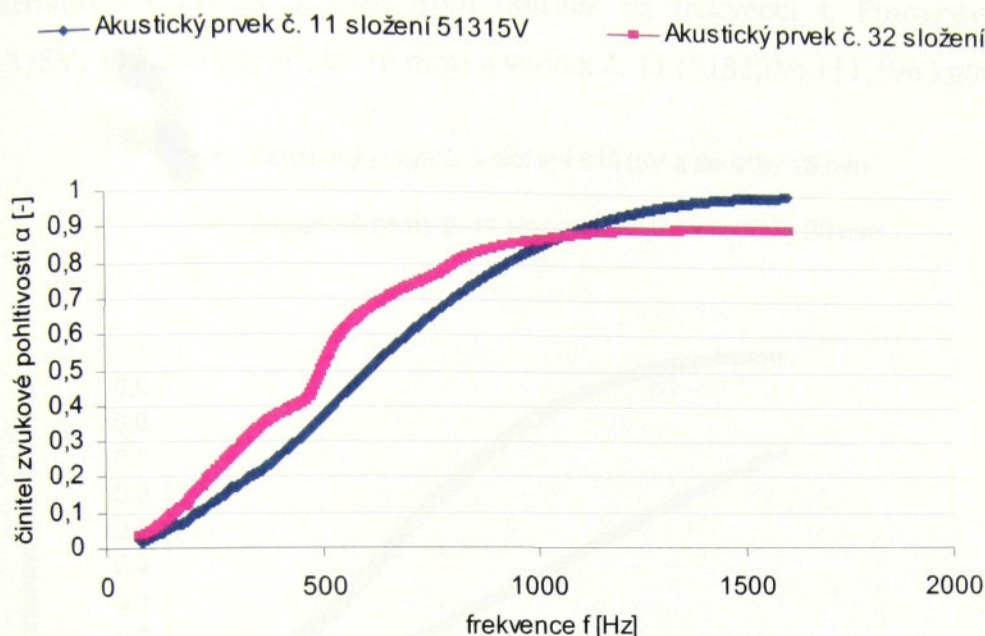
Graf 9: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků rozdílného materiálového složení a podobných tloušťek na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 3 (51315V; 112,204 kg/m³; $t = 16$ mm) a vzorek č. 21 (52425V; 112,204 kg/m³; $t = 16$ mm).



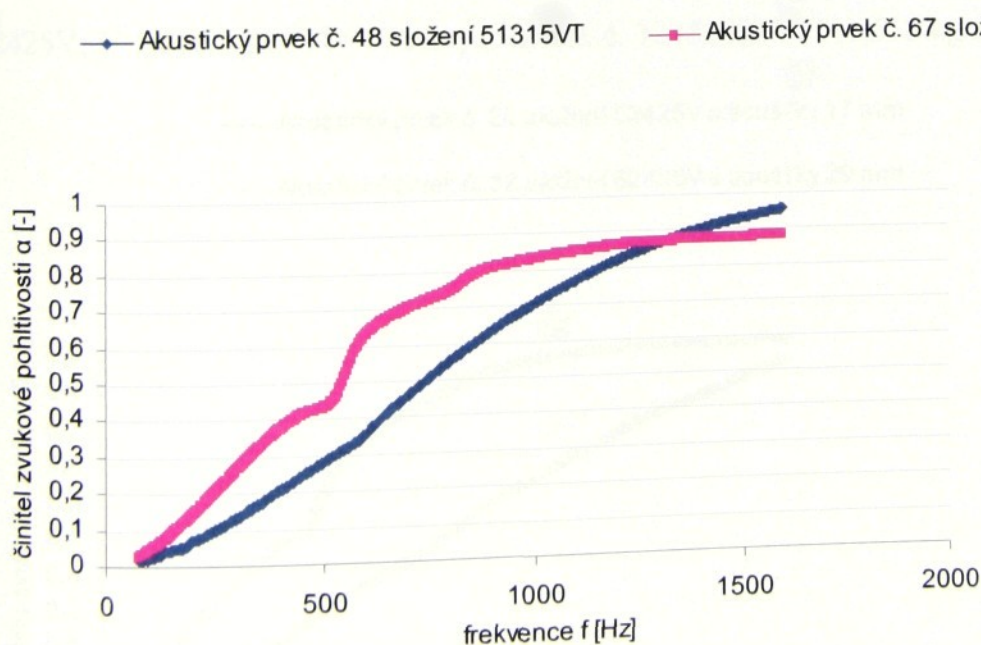
Graf 10: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků rozdílného materiálového složení a podobných tloušťek na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 46 (51315VT; 122,231 kg/m³; $t = 15$ mm) a vzorek č. 64 (52425VT; 119,139 kg/m³; $t = 14$ mm).



Graf 11: Porovnání závislostí činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků rozdílného materiálového složení a podobných tlouštěk na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 11 (51315V; 111,196 kg/m³; t = 30 mm) a vzorek č. 32 (52425V; 111,518 kg/m³; t = 29 mm).

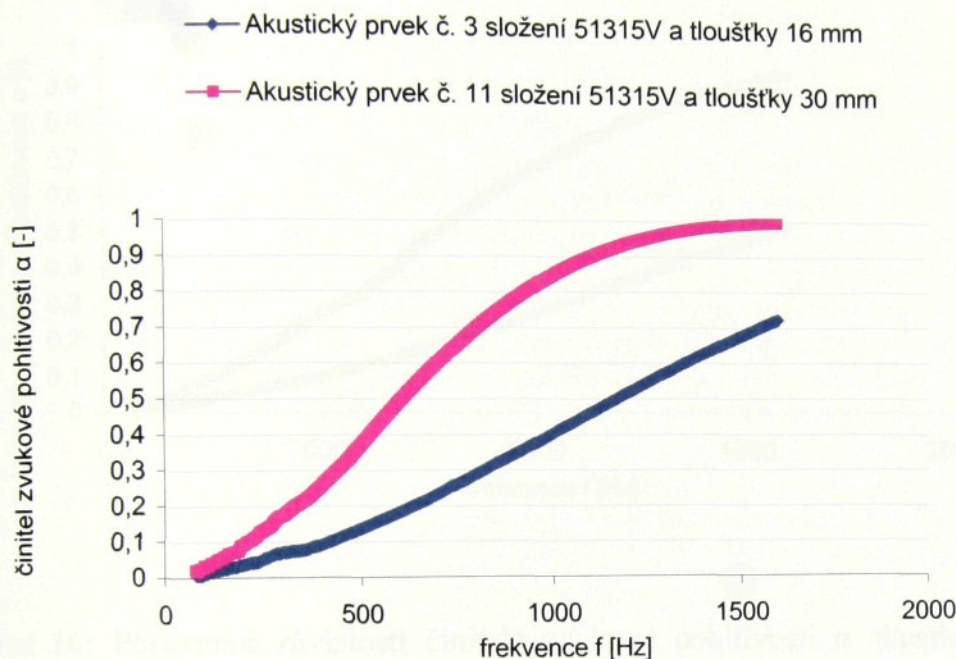


Graf 12: Porovnání závislostí činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků rozdílného materiálového složení a podobných tlouštěk na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 48 (51315VT; 124,495 kg/m³; t = 27 mm) a vzorek č. 67 (52425VT; 125,05 kg/m³; t = 28 mm).

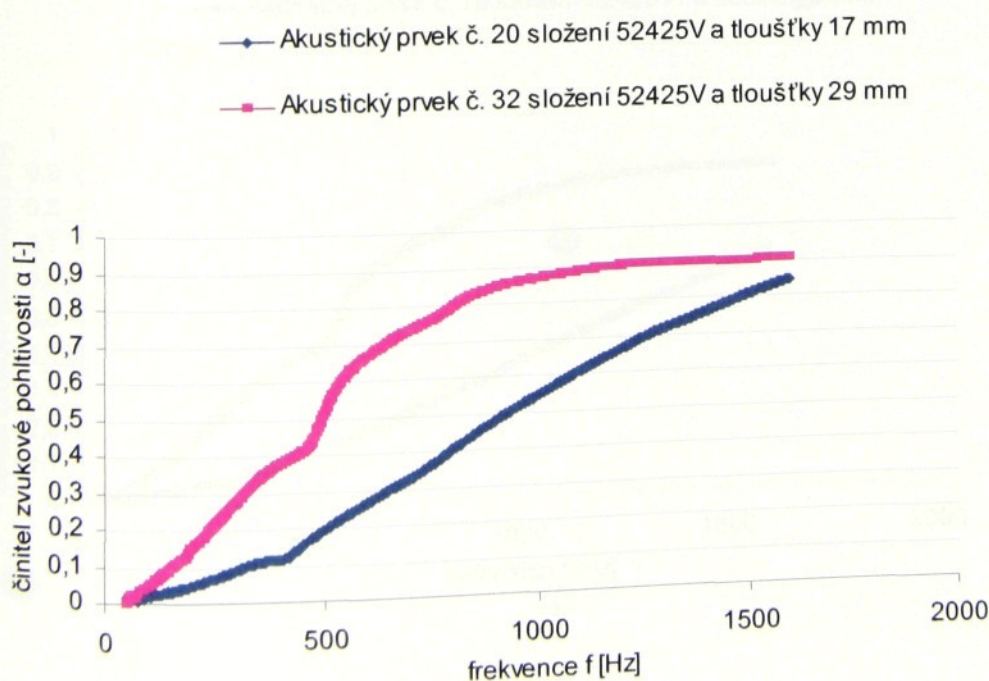


Grafické porovnání vertikálně konstruovaných akustických prvků stejného materiálového složení a rozdílných tloušťek

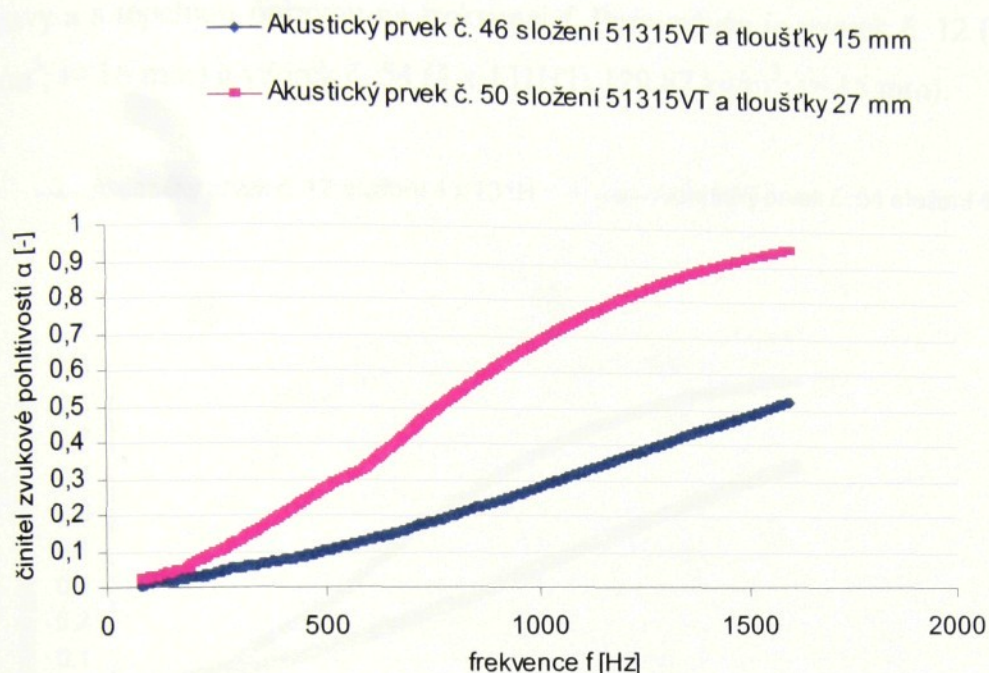
Graf 13: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků stejného materiálového složení a rozdílných tloušťek na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 3 (51315V; $112,204 \text{ kg/m}^3$; $t=16 \text{ mm}$) a vzorek č. 11 (51315V; $111,196 \text{ kg/m}^3$; $t=30 \text{ mm}$).



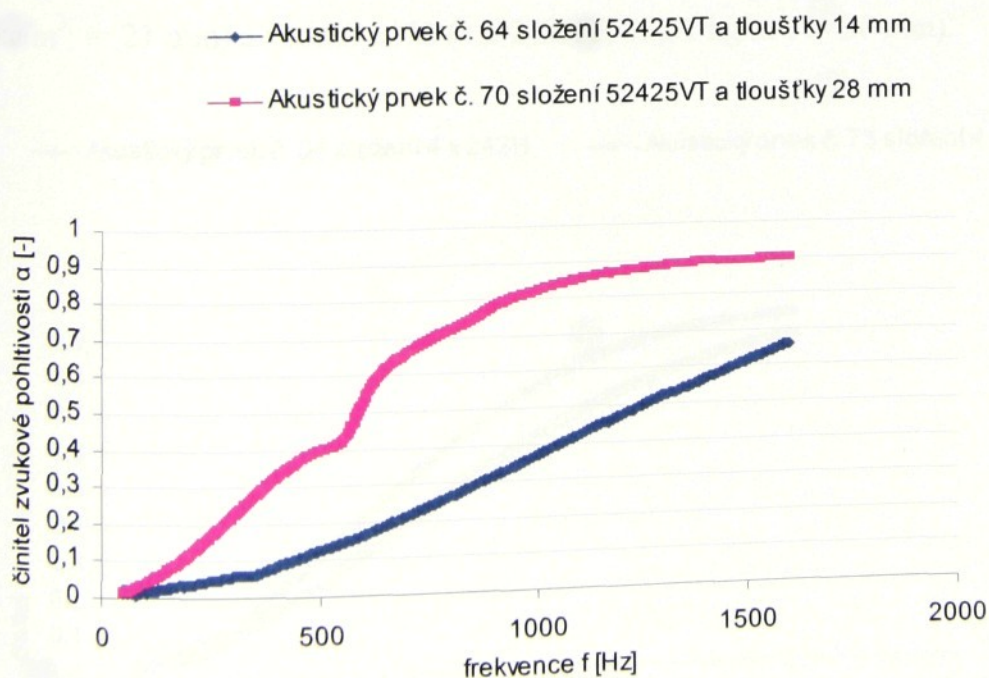
Graf 14: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků stejného materiálového složení a rozdílných tloušťek na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 20 (52425V; $111,596 \text{ kg/m}^3$; $t=17 \text{ mm}$) a vzorek č. 32 (52425V; $111,518 \text{ kg/m}^3$; $t=29 \text{ mm}$).



Graf 15: Porovnání závislostí činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků stejného materiálového složení a rozdílných tloušťek na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 46 (51315VT; 122,231 kg/m³; t = 15 mm) a vzorek č. 50 (51315VT; 122,137 kg/m³; t = 27 mm).

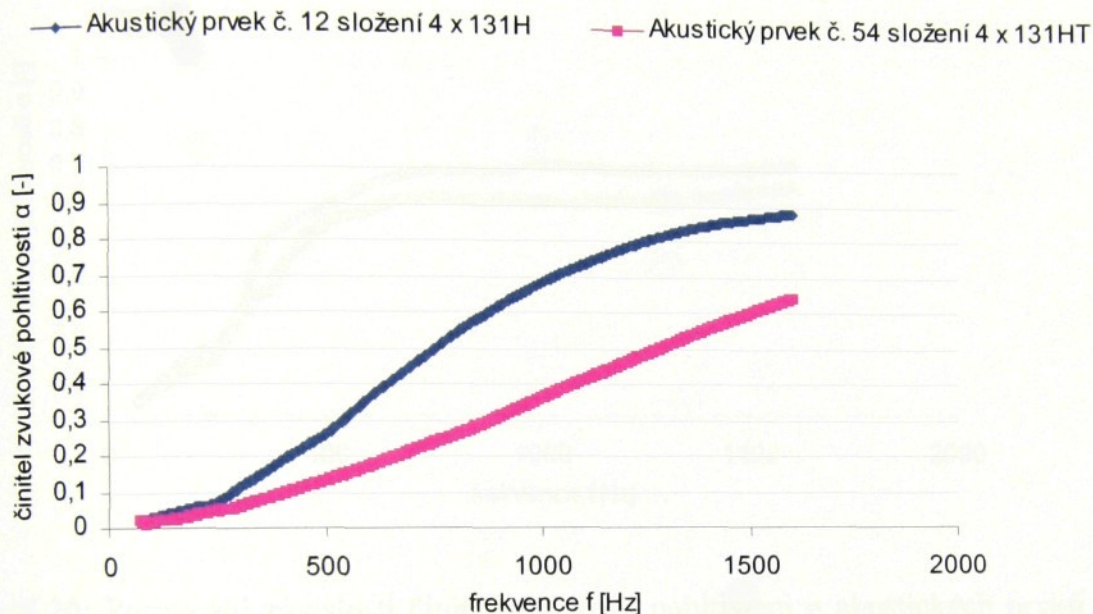


Graf 16: Porovnání závislostí činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků stejného materiálového složení a rozdílných tloušťek na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 64 (52425VT; 119,139 kg/m³; t = 14 mm) a vzorek č. 70 (52425VT; 119,594 kg/m³; t = 28 mm).

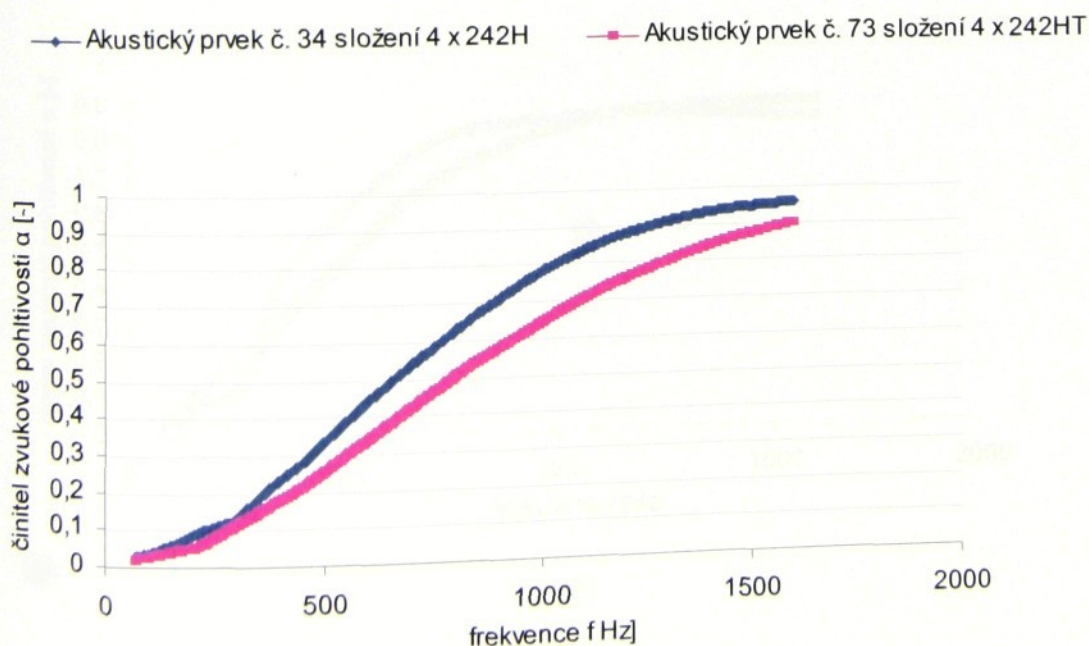


Grafické porovnání horizontálně konstruovaných akustických prvků s tepelnou úpravou a bez tepelné úpravy

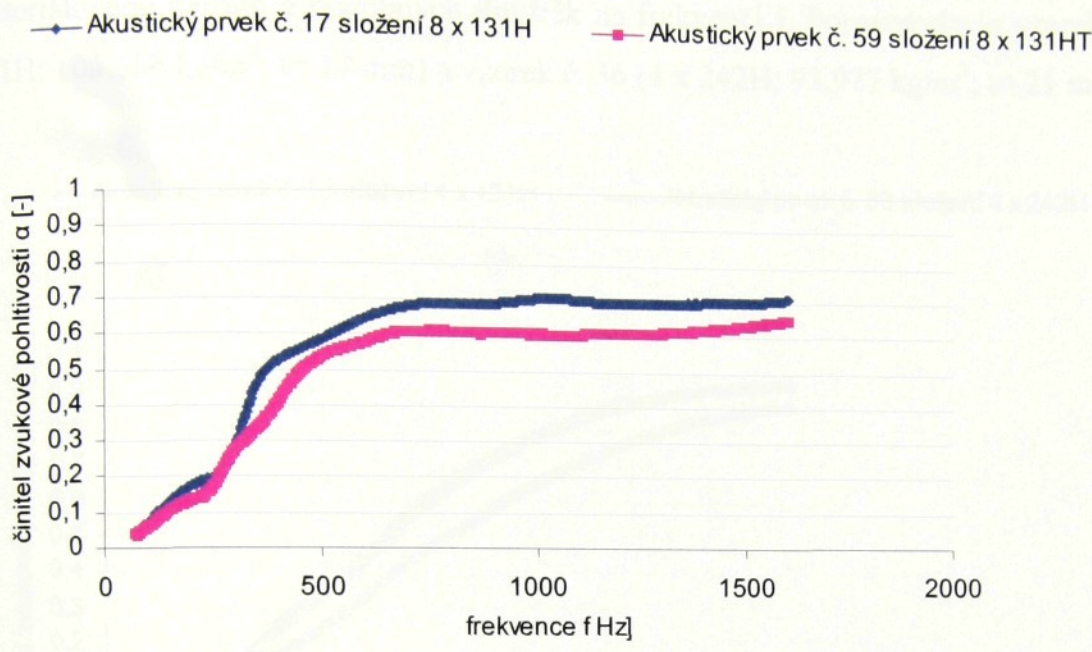
Graf 17: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků bez tepelné úpravy a s tepelnou úpravou na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 12 (4 x 131H; 112,204 kg/m³; t = 16 mm) a vzorek č. 54 (4 x 131HT; 129,87 kg/m³; t = 15 mm).



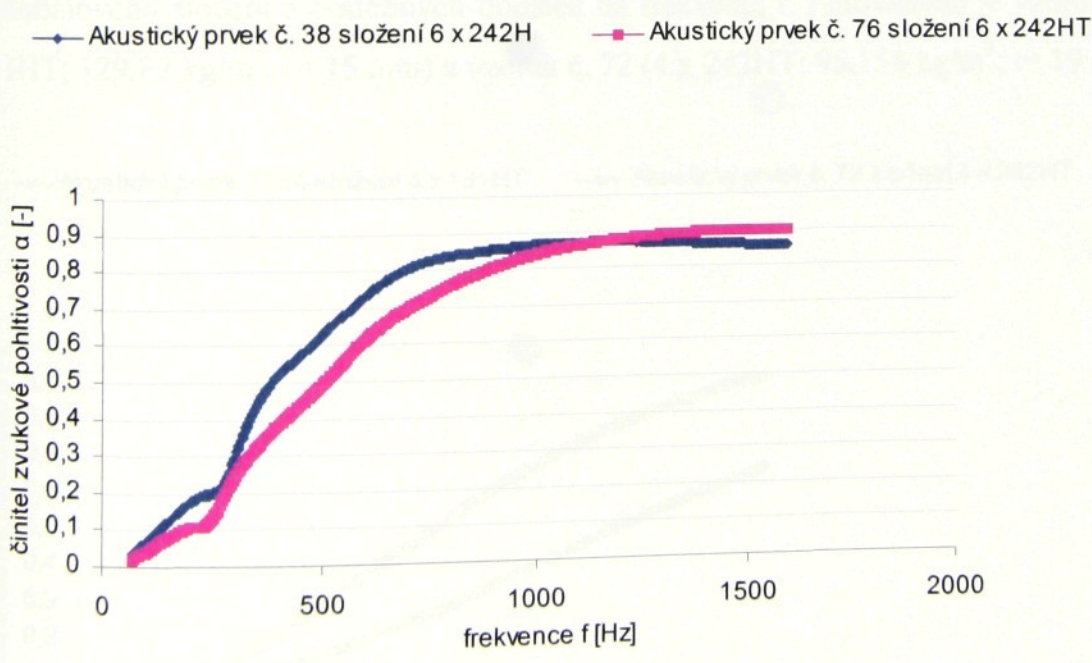
Graf 18: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků bez tepelné úpravy a s tepelnou úpravou na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 34 (4 x 242H; 92,158 kg/m³; t = 21 mm) a vzorek č. 73 (4 x 242HT; 92,31 kg/m³; t = 20 mm).



Graf 19: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků bez tepelné úpravy a s tepelnou úpravou na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 17 (8 x 131H; 114,592 kg/m³; t = 31 mm) a vzorek č. 59 (8 x 131HT; 122,231 kg/m³; t = 30 mm).

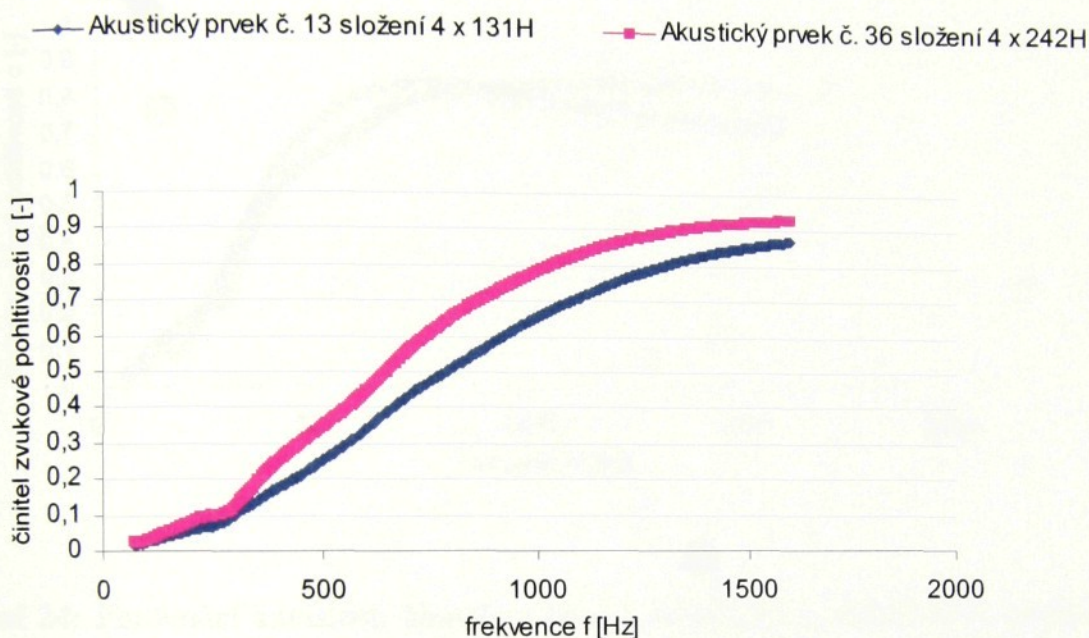


Graf 20: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků bez tepelné úpravy a s tepelnou úpravou na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 38 (6 x 242H; 87,933 kg/m³; t = 32 mm) a vzorek č. 76 (6 x 242HT; 88,305 kg/m³; t = 31 mm).

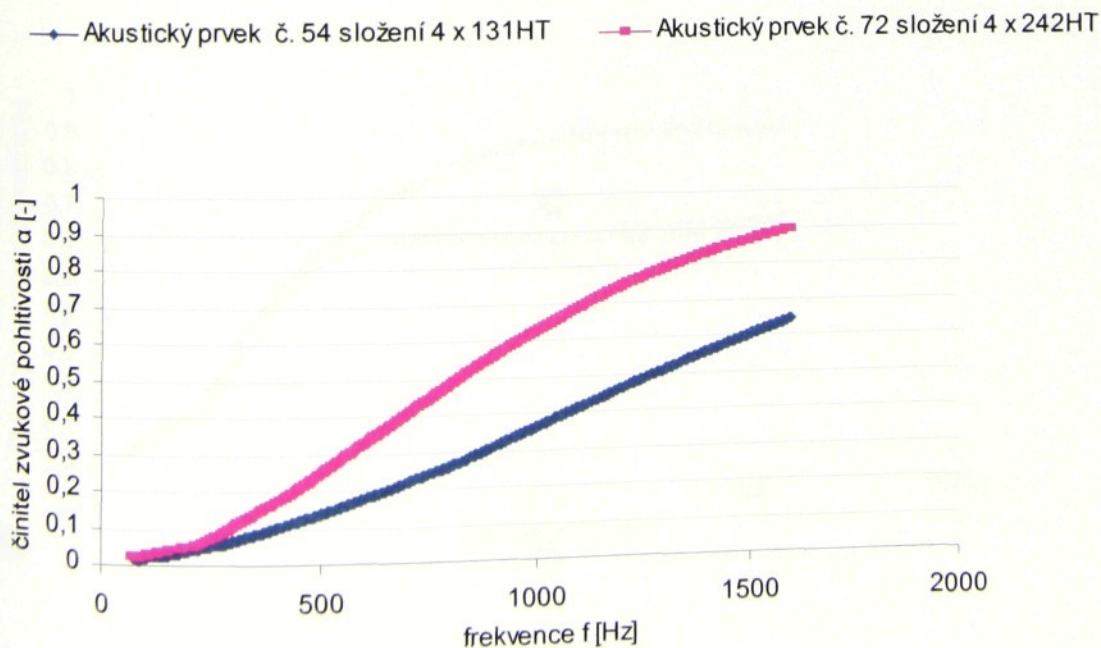


Grafické porovnání horizontálně konstruovaných akustických prvků rozdílného materiálového složení a podobných tloušťek

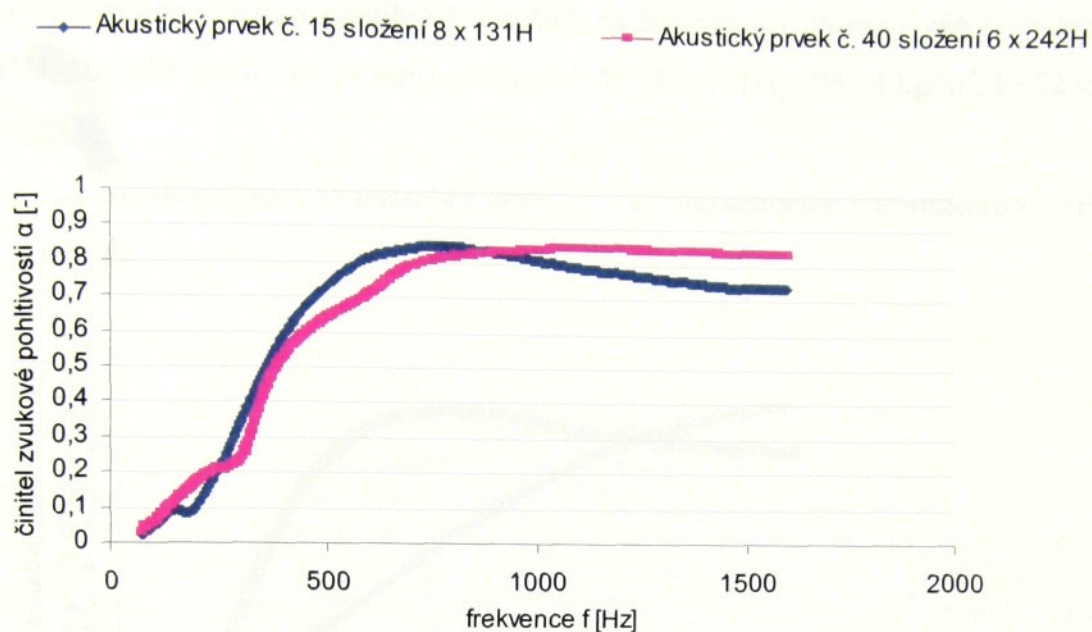
Graf 21: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků rozdílného materiálového složení a podobných tloušťek na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 13 (4 x 131H; 105,604 kg/m³; t = 17 mm) a vzorek č. 36 (4 x 242H; 93,977 kg/m³; t = 21 mm).



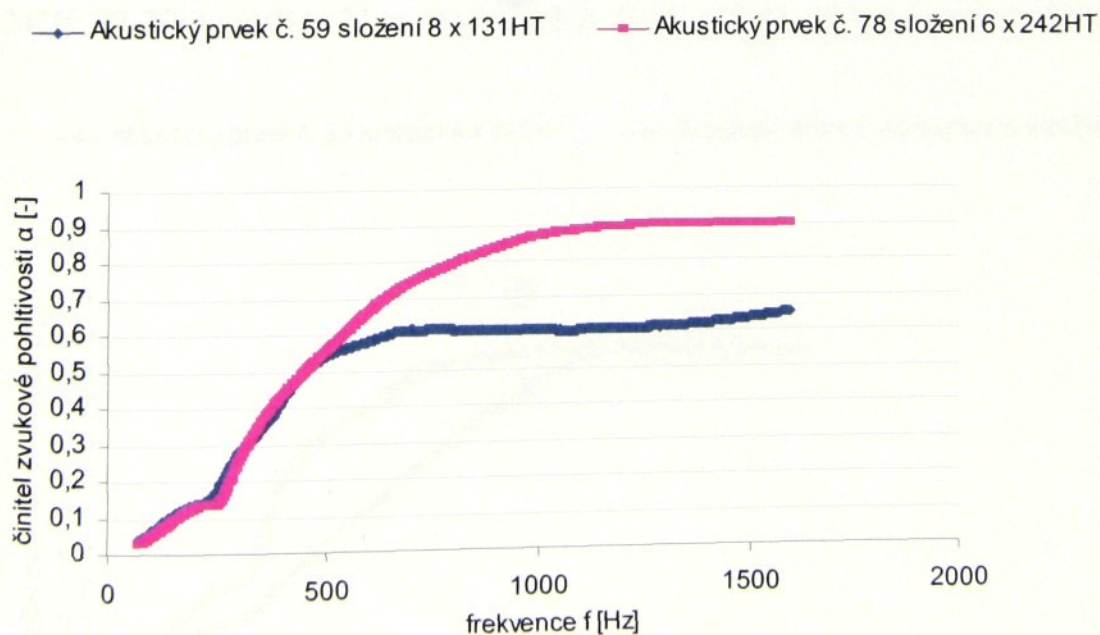
Graf 22: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků rozdílného materiálového složení a podobných tloušťek na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 54 (4 x 131HT; 129,87 kg/m³; t = 15 mm) a vzorek č. 72 (4 x 242HT; 95,158 kg/m³; t = 19 mm).



Graf 23: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků rozdílného materiálového složení a podobných tloušťek na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 15 (8 x 131H; 105,44 kg/m³; t = 32 mm) a vzorek č. 40 (6 x 242H; 93,106 kg/m³; t = 32 mm).

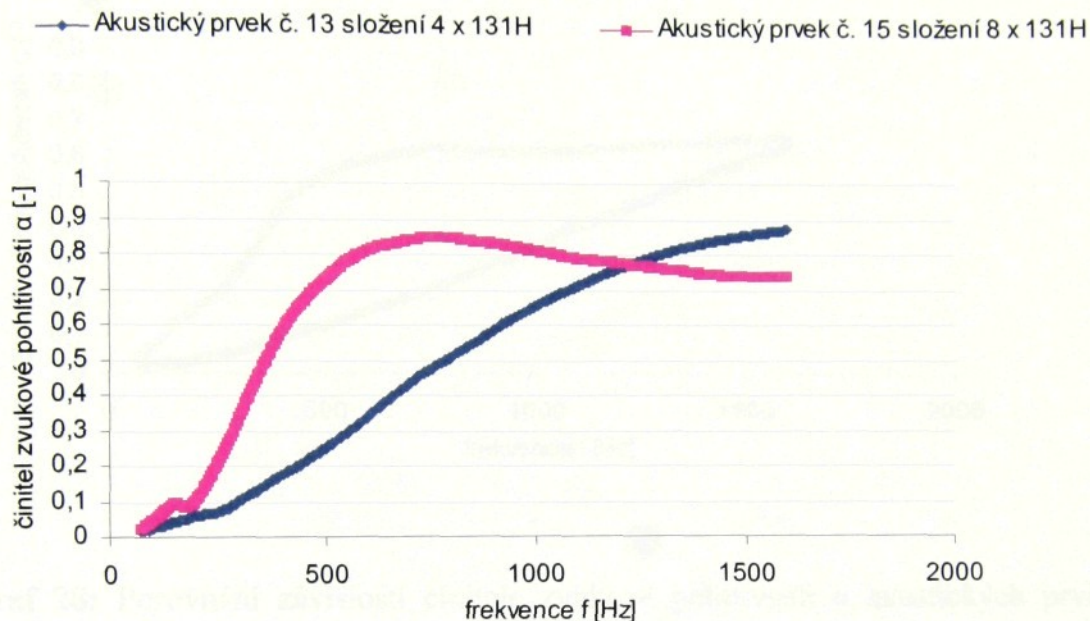


Graf 24: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků rozdílného materiálového složení a podobných tloušťek na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 59 (8 x 131HT; 122,231 kg/m³; t = 30 mm) a vzorek č. 78 (6 x 242HT; 91,828 kg/m³; t = 33 mm).

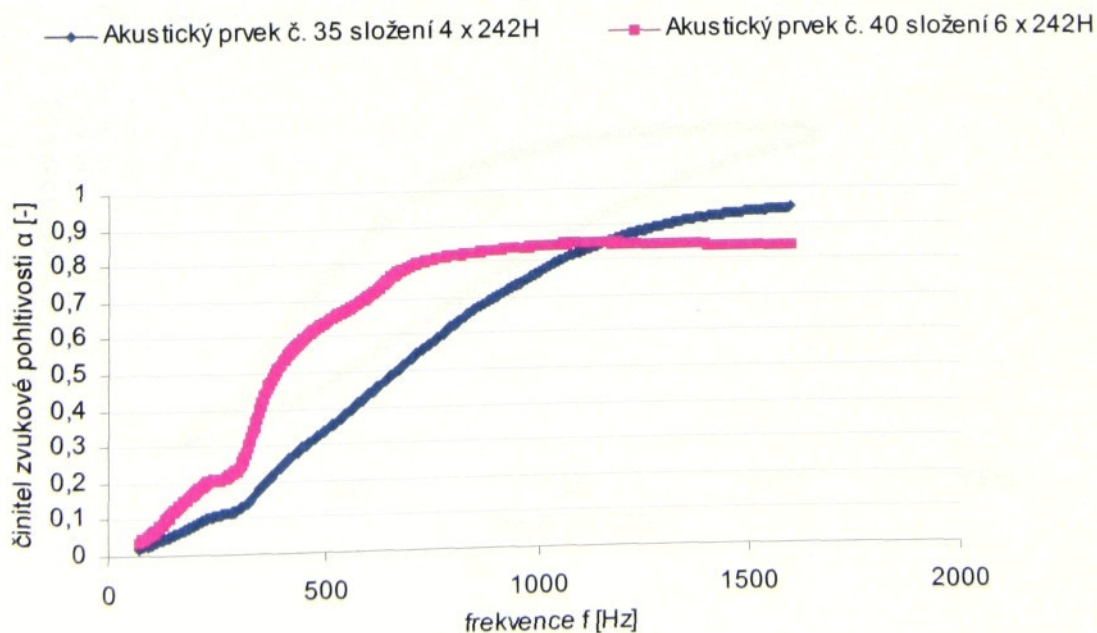


Grafické porovnání horizontálně konstruovaných akustických prvků stejného materiálového složení a rozdílných tloušťek

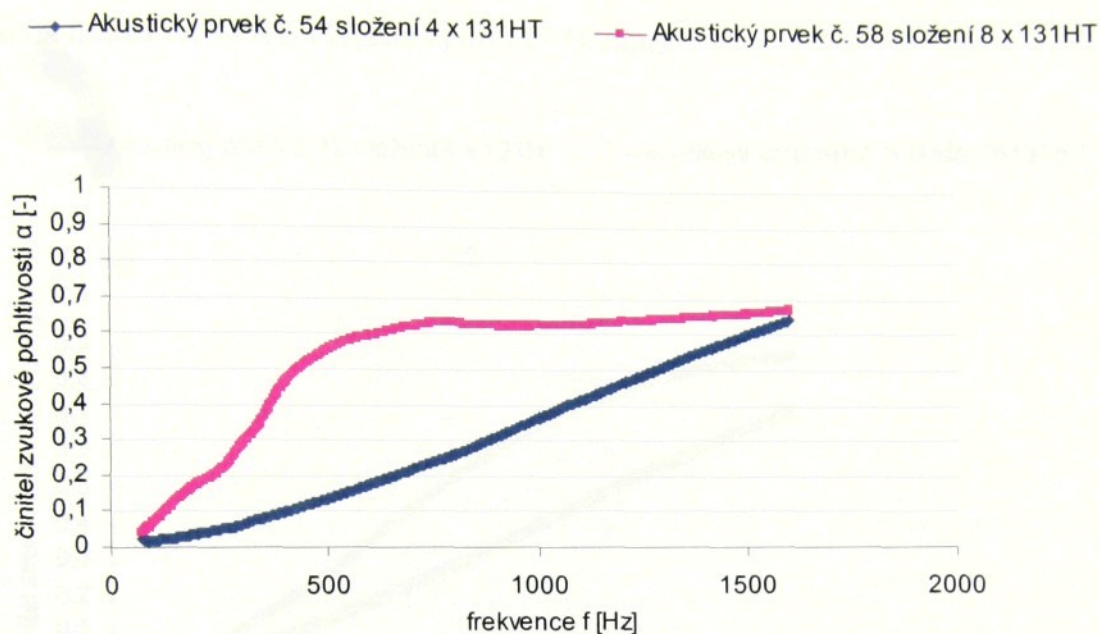
Graf 25: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků stejného materiálového složení a rozdílných tloušťek na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 13 (4 x 131H; 105,604 kg/m³; t = 17 mm) a vzorek č. 15 (8 x 131H; 105,44 kg/m³; t = 32 mm).



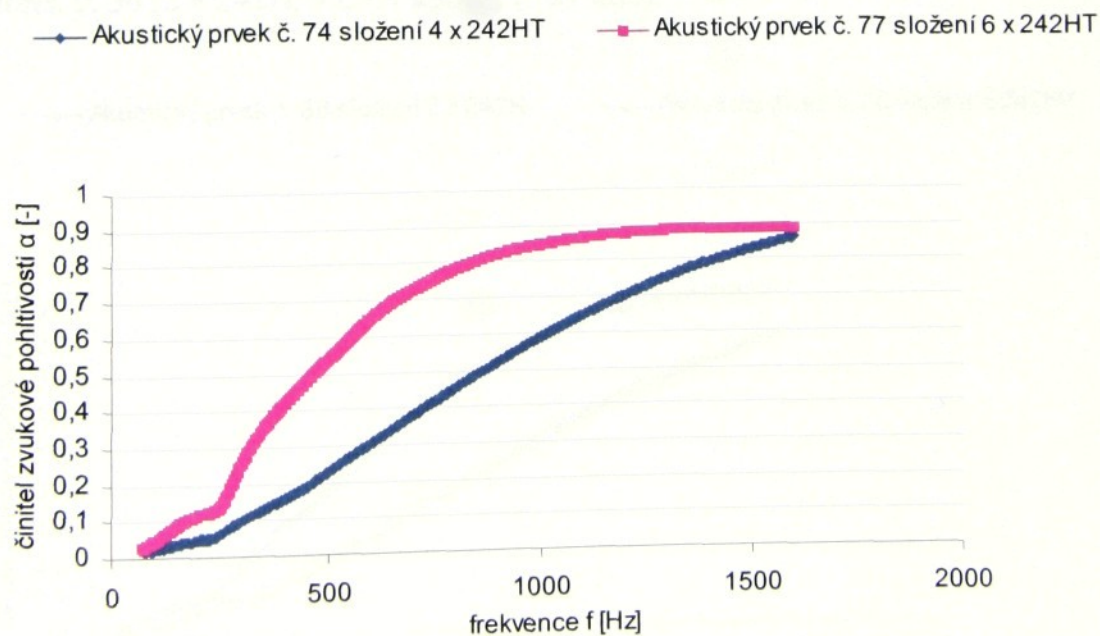
Graf 26: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků stejného materiálového složení a rozdílných tloušťek na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 35 (4 x 242H; 92,765 kg/m³; t = 21 mm) a vzorek č. 40 (6 x 242H; 93,106 kg/m³; t = 32 mm).



Graf 27: Porovnání závislostí činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků stejného materiálového složení a rozdílných tloušťek na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 54 (4 x 131HT; 129,87 kg/m³; t = 15 mm) a vzorek č. 58 (8 x 131HT; 128,597 kg/m³; t = 30mm).

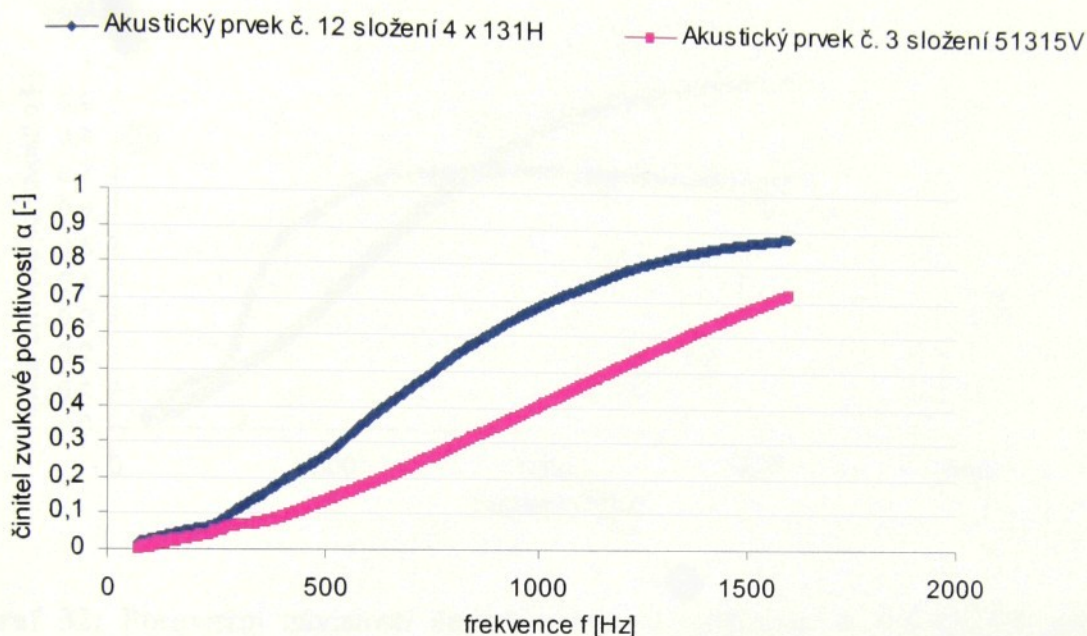


Graf 28: Porovnání závislostí činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků stejného materiálového složení a rozdílných tloušťek na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 74 (4 x 242HT; 89,127 kg/m³; t = 20 mm) a vzorek č. 77 (6 x 242HT; 88,716 kg/m³; t = 31 mm).

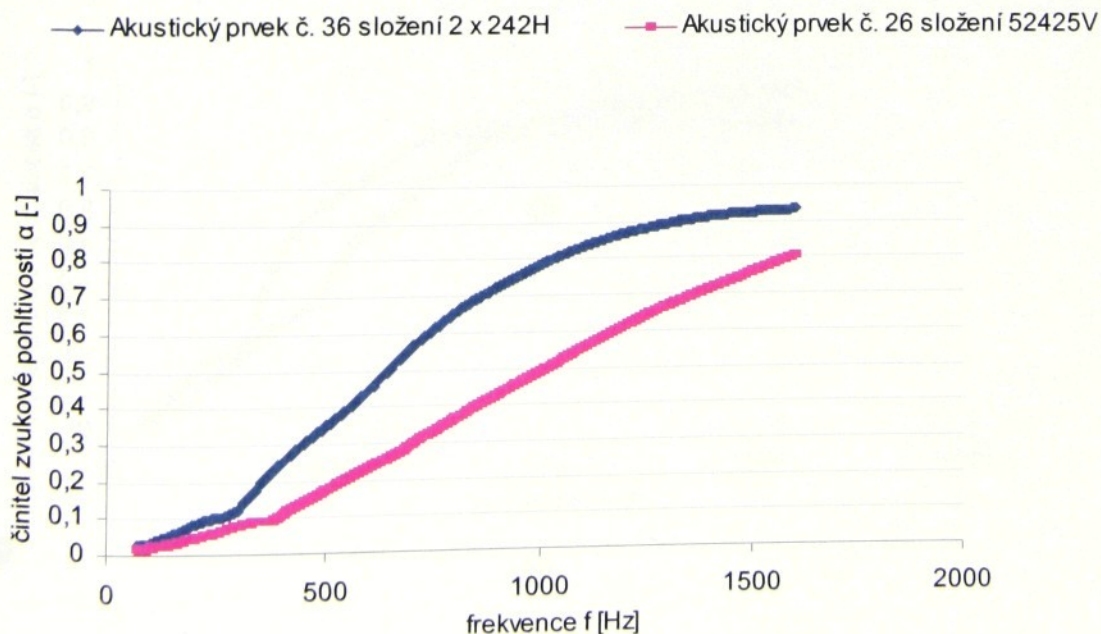


Grafické porovnání akustických prvků vertikální a horizontální konstrukce

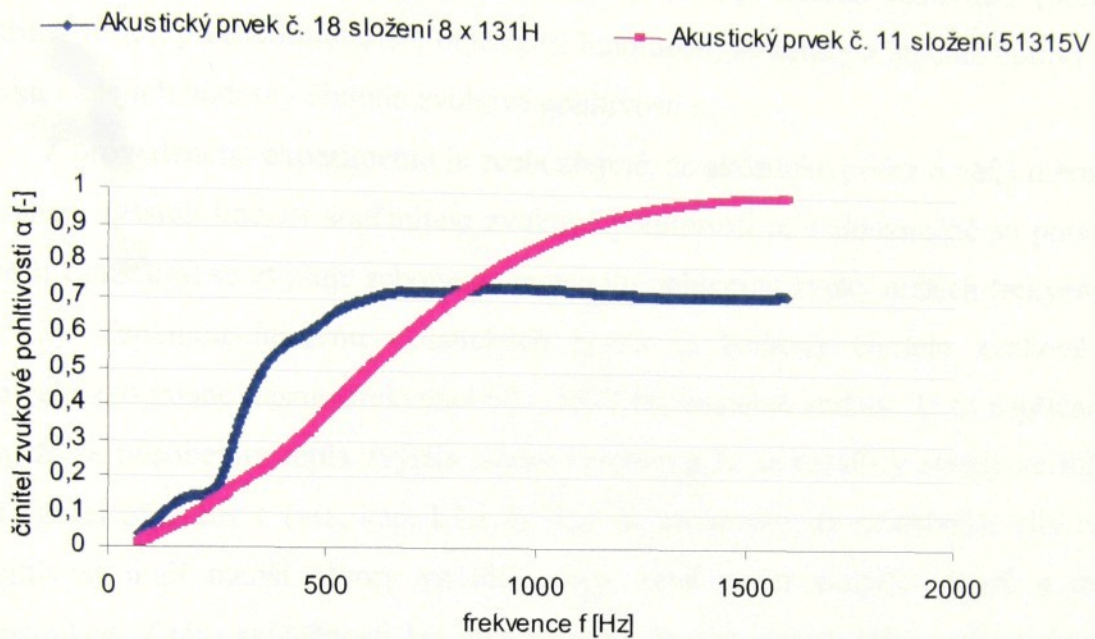
Graf 29: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků rozdílné konstrukce na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 3 (51315V; $112,204 \text{ kg/m}^3$; $t = 16 \text{ mm}$) a vzorek č. 12 ($4 \times 131\text{H}$; $112,204 \text{ kg/m}^3$; $t = 16 \text{ mm}$).



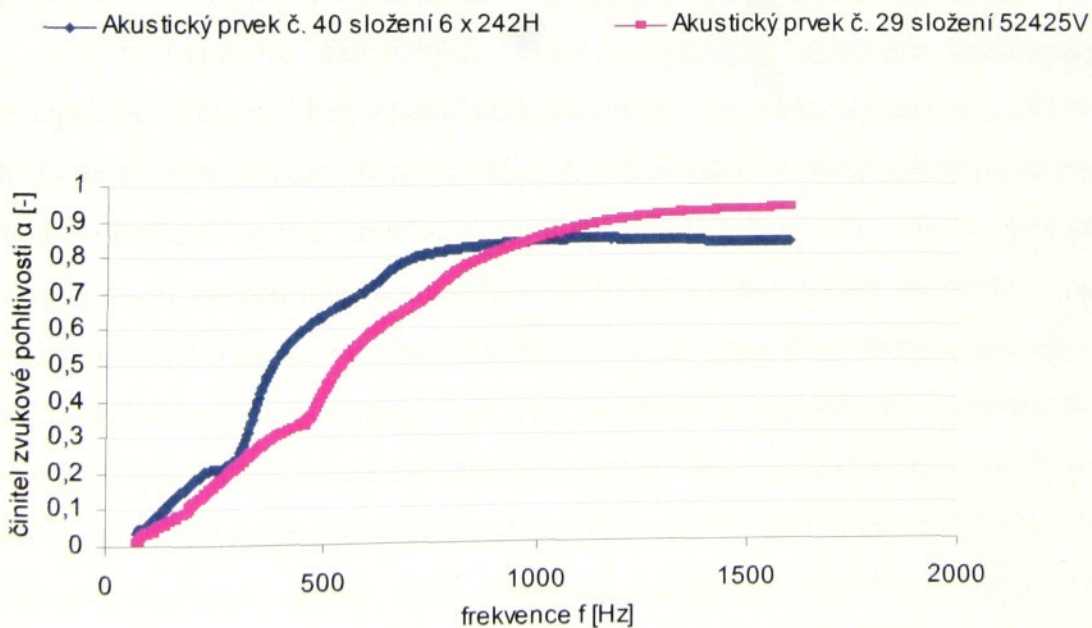
Graf 30: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků rozdílné konstrukce na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 26 (52425V; $107,43 \text{ kg/m}^3$; $t = 16 \text{ mm}$) a vzorek č. 36 ($2 \times 242\text{H}$; $93,977 \text{ kg/m}^3$; $t = 21 \text{ mm}$).



Graf 31: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků rozdílné konstrukce na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 11 (51315V; $111,196 \text{ kg/m}^3$; $t=30 \text{ mm}$) a vzorek č. 18 (8 x 131H; $111,717 \text{ kg/m}^3$; $t=31 \text{ mm}$).



Graf 32: Porovnání závislosti činitele zvukové pohltivosti α akustických prvků rozdílné konstrukce na frekvenci f . Porovnáván je vzorek č. 29 (52425V; $99,737 \text{ kg/m}^3$; $t=30 \text{ mm}$) a vzorek č. 40 (6 x 242H; $93,106 \text{ kg/m}^3$; $t=32 \text{ mm}$).



IV ZÁVĚR

Výsledky této práce potvrzují významný vliv použitého materiálu (poměr netkané textilie/ fólie), plošné hmotnosti, objemové hmotnosti, struktury a tepelné úpravy akustických prvků na jejich hodnoty činitele zvukové pohltivosti α .

Z provedeného experimentu je zcela zřejmé, že akustické prvky o větší měrné hmotnosti dosahují vyšších hodnot součinitele zvukové pohltivosti α . Jednoznačně se potvrdil fakt, že s větší tloušťkou se zvyšuje schopnost materiálu pohlcovat zvuky nižších frekvencí (viz. kap. I.1.1.2). Tepelnou úpravou akustických prvků se hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro celé zkoumané pásmo frekvencí 50 - 1600 Hz znatelně snížily. Je to zapříčiněno zřejmě tím, že se působením tepla zvýšila tuhost výrobku a že se rozšířily otvory ve fólii. Snížil se tak činitel přeměny ε (viz. kap. I.1.1.2). Tím se prokázalo, že příznivější vliv na zvukovou pohltivost mají menší otvory ve fólii, resp. větší počet malých otvorů a menší tuhost konstrukce. Z této skutečnosti lze tedy vyvodit, že přítomnost fólie v akustickém prvku má pozitivní vliv na sledované akustické vlastnosti.

Srovnávání vertikálně konstruovaných akustických prvků z rozdílných materiálů (s tepelnou úpravou i bez tepelné úpravy) ukazuje, že prvky složení 52425V (větší hodnota poměru netkaná textilie/ fólie) dosahují u většiny případů vyšších hodnot součinitele zvukové pohltivosti. To se potvrdilo zejména u srovnávání vzorků menších tlouštěk.

Z porovnávání akustických prvků z rozdílných materiálů horizontální konstrukce (s tepelnou úpravou i bez tepelné úpravy) vychází, že prvky složení 4 x 242 a 6 x 242 (větší hodnota poměru netkaná textilie/ fólie) dosahují téměř v celém sledovaném pásmu frekvencí větších hodnot, oproti prvkům složení 4 x 131 a 8 x 131. To je opět patrné zejména u srovnávání vzorků menších tlouštěk. Z těchto závěrů vyplývá, že prvky vzniklé kombinací bílé hmotnější netkané textilie a černé tenčí fólie (použité materiály viz. tab. 12) mají lepší sledované akustické vlastnosti. Na vyšší zvukovou pohltivost má pravděpodobně vliv nejen hmotnost ale i složení netkané textilie a účinek fólie. Vzhledem k tomu, že má bílá netkaná textilie podobné materiálové složení jako barevná, ale neobsahuje nitě (oproti vrstvě barevné), můžeme usuzovat, že na vyšší zvukovou pohltivost má vliv jemnější surovina. Černá polyetylenová fólie (70 g/m^2) je oproti červené polyetylenové fólii (200 g/m^2) lehčí a tenčí a má vyšší hodnotu teploty tání. Všechny akustické prvky byly tepelně upravovány za stejných podmínek- teplota, čas. Je tedy možné, ačkoliv to není na pohled zcela patrné, že se otvory

v červené tlustší fólii zvětšily a navzájem propojily více než v černé tenčí fólii. To mohlo být jednou z příčin menší zvukové pohltivosti α akustických prvků s červenou fólií.

Vliv konstrukce akustických prvků na jejich akustické vlastnosti se podle předpokladů (viz. kap. I.1.1.2.) potvrdil zejména u vzorků menších tloušťek, kde horizontálně konstruované prvky dosahují lepších výsledků. U vzorků vyšších tloušťek se předpoklad potvrdil pouze v pásmu nižších a středních frekvencí sledovaného pásma.

Srovnáme-li hodnoty činitele zvukové pohltivosti α prověřovaných akustických prvků (viz. tab. 14 a tab. 1 v příloze 4) s některými v praxi používanými výrobky pro pohlcování zvuku strojů (viz. tab. 4- 7, resp. grafy 1- 4), je patrné, že výrobky z osvědčených materiálů, jako jsou skleněná vlákna atd., dosahují příznivějších hodnot α při menších objemových hmotnostech i tloušťkách. Nejvíce se hodnotám činitele zvukové pohltivosti α příslušející rohože ze skleněných vláken (bez povrchové úpravy) o objemové hmotnosti 64 kg/m^3 a tloušťky 25 mm (viz. tab. 1) přibližují hodnoty α prvku 6 x 242V o průměrné objemové hmotnosti $\overline{m_o} = 89,72 \text{ kg/m}^3$ a průměrné tloušťky $\bar{t} = 32 \text{ mm}$. Hodnoty činitele zvukové pohltivosti α jsou si v celém studovaném pásmu frekvencí velmi podobné a grafy mají velmi podobný průběh.

Z výsledků této práce je zřejmé, že prověřované akustické prvky dosahují při nízkých frekvencích poměrně vysokých hodnot činitele zvukové pohltivosti α . Tyto hodnoty jsou však dosahovány na vzorcích s velkou měrnou hmotností. Proto jsou navržené akustické prvky použitelné zejména v aplikacích, kde nezáleží na hmotnosti případně objemu výrobku.

Použitá literatura:

- [1] Němeček, P.: Hluk v technické praxi I.. Skripta TU v Liberci, Liberec 1998.
- [2] Kopal, A.: Fyzika I.. Skripta TU v Liberci, Liberec 2005.
- [3] Ransdorf, J.: Základní zásady pro snižování hluku. Vydavatelství ČSVTS. Praha 1988.
- [4] Shoshani, Y. - Yakubov, Y.: A Model for Calculating the Noise Absorption Capacity of Nonwoven Fiber Webs. Textile Res. J., 1999, vol. 69, no. 7.
- [5] Dlábková, L.: Vliv strukturních parametrů na zvukově izolační vlastnosti vlákenných materiálů. Diplomová práce, Technická univerzita v Liberci 2004.
- [6] Nový, R.: Hluk a chvění. Vydavatelství ČVUT. Praha 2000.
- [7] Dahl, M. D. - Rice, E. J. - Groesbeck, D. E.: Effects of Fiber Motion on the Acoustic Behaviour of an Anisotropic, Flexible Fibrous Material. J. Acoust. Soc. Am., 1990, vol. 87, no. 1.
- [8] www.kineticsnoise.com
- [9] www.controlnoise.com
- [10] Kolmer, J. - Kyncl, J.: Prostorová akustika. Praha 1980.
- [11] Technical Documentation. Impedance Measurement Tubes Types 4206 and 4206 A- User manual.
- [12] Jirsák, O. - Macková, I.: Netkané textilie. Skripta TU v Liberci, Liberec 1997.
- [13] Albrecht, W. - Fuchs, H. - Kittelmann, W.: Vliesstoffe. Wiley-Vch. Verlag GmbH. D-69469 Weinheim (Federal Republic of Germany) 2000.
- [14] www.itdg.org/docs/technical_information_service/recycling_plastics.pdf
- [15] plastics.turkavkaz.ru/processes/extrusion/blown-film-extrusion

V PŘÍLOHY

Příloha 1

Plošná hmotnost netkaných textilií, fólií a armovací textilie byla stanovena vždy jako střední hodnota plošných hmotností pěti vzorků. Jednotlivé plošné hmotnosti byly určeny ze vzorků o ploše 52 900 mm² (netkané textilie) a ze vzorků o ploše 10 000 mm² (fólie, armovací textilie), u kterých byla určena hmotnost. Tloušťka byla měřena na laboratorním tloušťkoměru vždy na čtyřech místech vzorku. Z těchto měření se získala střední hodnota tloušťky pro jednotlivé vzorky a následně střední hodnota tloušťky pro daný materiál.

Tab. 1: Vzorky „barevné“ netkané textilie. Symbol Ø značí střední hodnotu tloušťky [mm], resp. plošné hmotnosti vzorku [g/m²].

Číslo vzorku	Tloušťka [mm]	Plošná hmotnost [g/m ²]
1	1,23	115
2	1,1	110
3	1,26	120
4	1,26	100
5	1,21	120
Ø	1,21	113
s	0,07	8,37
v	5,78	7,4

Tab. 2: Vzorky „bílé“ netkané textilie. Symbol Ø značí střední hodnotu tloušťky [mm], resp. plošné hmotnosti vzorku [g/m²].

Číslo vzorku	Tloušťka [mm]	Plošná hmotnost [g/m ²]
1	2,1	230
2	1,87	210
3	1,78	200
4	1,95	210
5	1,82	220
Ø	1,9	214
s	0,13	11,4
v	6,8	5,3

Tab. 3: Vzorky „červené“ polyetylenové fólie. Symbol Ø značí střední hodnotu tloušťky [mm], resp. plošné hmotnosti vzorku [g/m²].

Číslo vzorku	Tloušťka [mm]	Plošná hmotnost [g/m ²]
1	0,94	200
2	0,95	200
3	0,92	200
4	0,9	200
5	0,91	200
Ø	0,92	200
s	0,02	0
v	2,2	0

Tab. 4: Vzorky „černé“ polyetylenové fólie. Symbol Ø značí střední hodnotu tloušťky [mm], resp. plošné hmotnosti vzorku [g/m²].

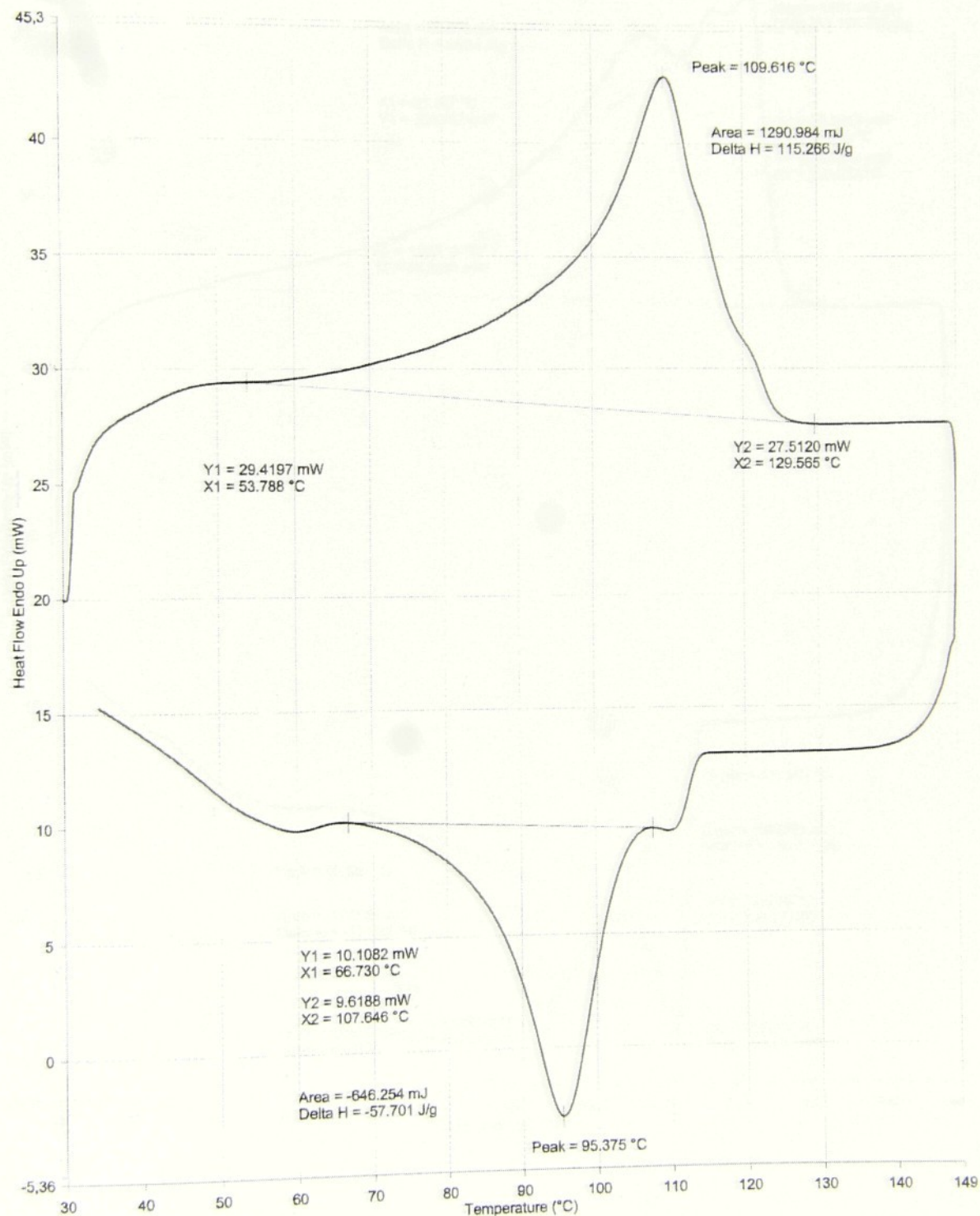
Číslo vzorku	Tloušťka [mm]	Plošná hmotnost [g/m ²]
1	0,1	70
2	0,1	70
3	0,1	70
4	0,1	70
5	0,1	70
Ø	0,1	70
s	0	0
v	0	0

Tab. 5: Vzorky armovací textilie (mřížky). Symbol Ø značí střední hodnotu tloušťky [mm], resp. plošné hmotnosti vzorku [g/m²].

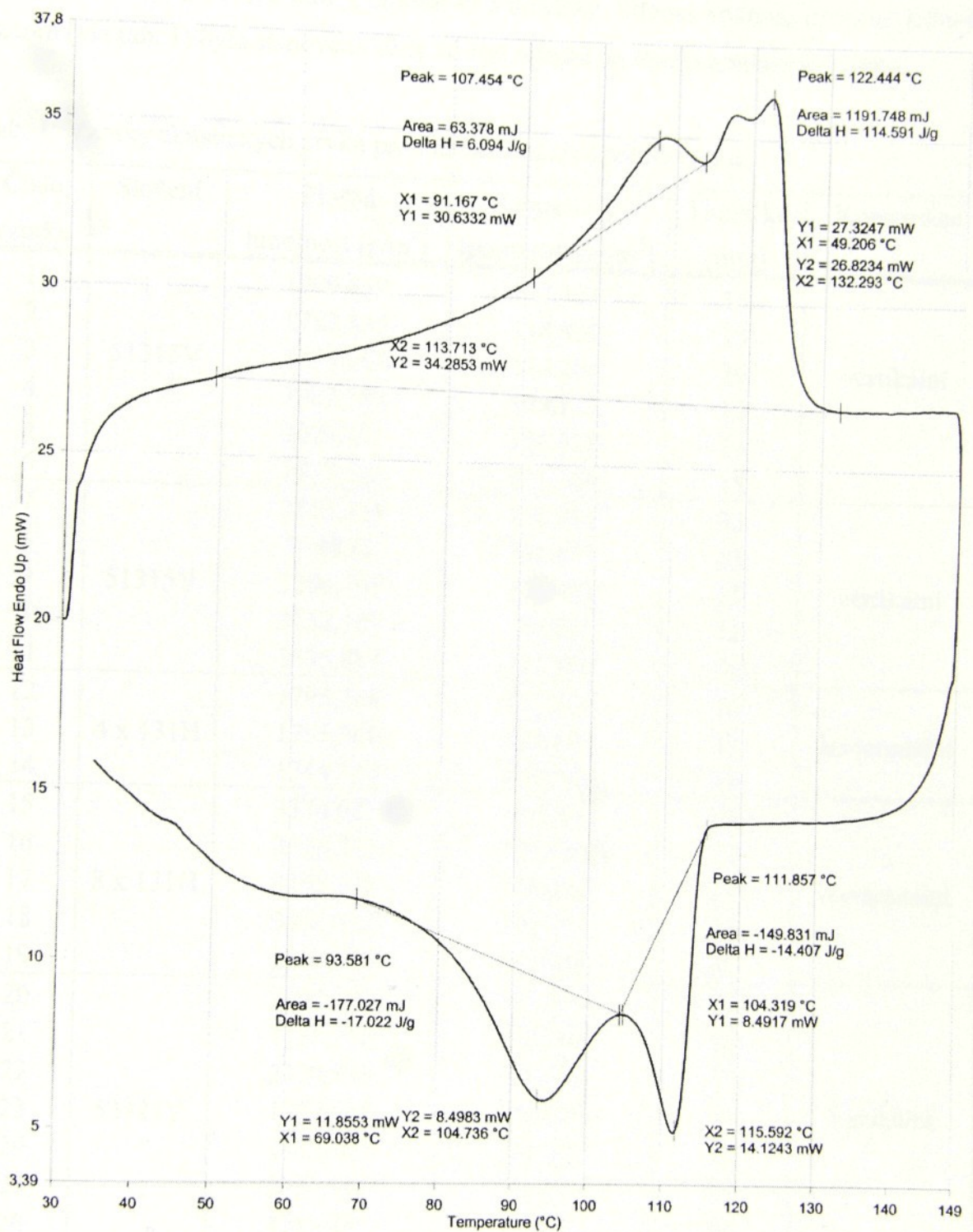
Číslo vzorku	Tloušťka [mm]	Plošná hmotnost [g/m ²]
1	0,17	29
2	0,17	31
3	0,17	30
Ø	0,17	30
s	0	1
v	0	3,3

Příloha 2

Graf 1: Grafický záznam z diferenční skenovací kalorimetrie (DSC)- závislost tepelného toku (mW) ve vzorku červené polyetylenové fólie na teplotě (°C).



Graf 2: Grafický záznam z diferenční skenovací kalorimetrie (DSC)- závislost tepelného toku (mW) ve vzorku černé polyetylenové fólie na teplotě (°C).



Příloha 3

Jednotlivé plošné a objemové hmotnosti vzorků akustických prvků byly určeny z jejich měrného obsahu ($7853,98 \text{ mm}^2$), hmotnosti a tloušťky. Střední hodnota tloušťky jednotlivých vzorků (viz tab. 1) byla stanovena vždy ze čtyř měření na různých místech vzorku.

Tab. 1: Vzorky akustických prvků pro měření zvukové pohltivosti α .

Číslo vzorku	Složení	Plošná hmotnost [g/m^2]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Tloušťka [mm]	Konstrukce
1	51315V	1909,859	127,324	15	vertikální
2		1782,535	118,836	15	
3		1795,268	112,204	16	
4		1922,592	128,173	15	
5		2024,451	126,528	16	
6		1973,521	131,568	15	
7	51315V	3552,338	111,011	32	vertikální
8		3348,62	101,473	33	
9		3246,761	101,461	32	
10		3132,169	97,88	32	
11		3335,888	111,196	30	
12	4 x 131H	1795,268	112,204	16	horizontální
13		1795,268	105,604	17	
14		1744,338	109,021	16	
15	8 x 131H	3374,085	105,44	32	horizontální
16		3628,733	109,962	33	
17		3552,338	114,592	31	
18		3463,212	111,717	31	
19		3501,409	112,949	31	
20	52425V	1897,127	111,596	17	vertikální
21		1795,268	112,204	16	
22		2100,845	123,579	17	
23		1922,592	113,094	17	
24		1833,465	114,592	16	
25		2037,183	119,834	17	
26		1718,873	107,43	16	
27		1782,535	111,409	16	
28	52425V	3183,099	102,681	31	vertikální
29		2992,113	99,737	30	
30		2992,113	99,737	30	
31		3030,31	104,493	29	
32		3234,028	111,518	29	
33		3183,099	106,103	30	

Pokračování tab. 1 (příloha 3):

Číslo vzorku	Složení	Plošná hmotnost [g/m ²]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Tloušťka [mm]	Konstrukce
34	4 x 242H	1935,324	92,158	21	horizontální
35		1948,057	92,765	21	
36		1973,521	93,977	21	
37		1795,268	85,489	21	
38	6 x 242H	2813,859	87,933	32	horizontální
39		2813,859	87,933	32	
40		2979,381	93,106	32	
41		2877,52	89,923	32	
42	51315VT	1642,479	126,345	13	vertikální
43		1655,211	127,324	13	
44		1909,859	127,324	15	
45		1693,409	130,262	13	
46		1833,465	122,231	15	
47		1655,211	127,324	13	
48	51315VT	3361,352	124,495	27	vertikální
49		3310,423	122,608	27	
50		3297,69	122,137	27	
51		3539,606	131,097	27	
52		3297,69	122,137	27	
53		3157,634	116,949	27	
54	4 x 131HT	1948,057	129,87	15	horizontální
55		1973,521	131,568	15	
56		2088,113	139,208	15	
57	8 x 131HT	3705,127	127,763	29	horizontální
58		3857,916	128,597	30	
59		3666,93	122,231	30	
60		3756,057	125,202	30	
61	52425VT	1578,817	112,773	14	vertikální
62		1566,085	111,863	14	
63		1515,155	108,225	14	
64		1667,944	119,139	14	
65		1667,944	119,139	14	
66		1617,014	115,501	14	
67	52425VT	3501,409	125,05	28	vertikální
68		3234,028	119,779	27	
69		3081,24	118,509	26	
70		3348,62	119,594	28	
71		3297,69	117,775	28	

Pokračování tab. 1 (příloha 3):

Číslo vzorku	Složení	Plošná hmotnost [g/m ²]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Tloušťka [mm]	Konstrukce
72	4 x 242HT	1808	95,158	19	horizontální
73		1846,197	92,31	20	
74		1782,535	89,127	20	
75		1769,803	93,148	19	
76	6 x 242HT	2737,465	88,305	31	horizontální
77		2750,197	88,716	31	
78		3030,31	91,828	33	
79		2813,859	85,269	33	

Příloha 4

Tab. 1: Naměřené hodnoty součinitele zvukové pohltivosti α vzorků akustických prvků.

Číslo vzorku	Složení	Tloušťka [mm]	Činitel zvukové pohltivosti α [-]				
			Frekvence f [Hz]				
			125	250	500	1000	1600
1	51315V	15	0,02	0,049	0,13	0,37	0,668
2		15	0,017	0,049	0,122	0,358	0,659
3		16	0,021	0,051	0,138	0,403	0,723
4		15	0,018	0,049	0,118	0,376	0,693
5		16	0,024	0,064	0,174	0,507	0,818
6		15	0,02	0,055	0,137	0,436	0,754
7	51315V	32	0,05	0,162	0,427	0,895	0,98
8		33	0,044	0,141	0,391	0,85	0,993
9		32	0,045	0,145	0,402	0,861	0,998
10		32	0,042	0,133	0,374	0,85	0,997
11		30	0,046	0,143	0,388	0,863	0,996
12	4 x 131H	16	0,036	0,074	0,263	0,684	0,879
13		17	0,033	0,07	0,251	0,657	0,871
14		16	0,036	0,074	0,264	0,669	0,858
15	8 x 131H	32	0,072	0,214	0,729	0,81	0,737
16		33	0,106	0,208	0,67	0,732	0,723
17		31	0,103	0,194	0,586	0,703	0,709
18		31	0,091	0,171	0,637	0,732	0,719
19		31	0,09	0,239	0,665	0,734	0,725
20	52425V	17	0,025	0,066	0,194	0,55	0,845
21		16	0,021	0,061	0,173	0,513	0,821
22		17	0,026	0,073	0,198	0,59	0,857
23		17	0,025	0,067	0,197	0,558	0,848
24		16	0,022	0,0617	0,179	0,521	0,827
25		17	0,027	0,074	0,219	0,621	0,878
26		16	0,024	0,06	0,173	0,494	0,802
27		16	0,023	0,059	0,166	0,49	0,801
28	52425V	31	0,055	0,177	0,442	0,868	0,931
29		30	0,052	0,166	0,427	0,85	0,932
30		30	0,054	0,166	0,42	0,852	0,929
31		29	0,056	0,179	0,441	0,869	0,937
32		29	0,068	0,214	0,514	0,868	0,901
33		30	0,065	0,197	0,505	0,877	0,922

Pokračování tab. 1 (příloha 4):

Číslo vzorku	Složení	Tloušťka [mm]	Činitel zvukové pohltivosti α [-]				
			Frekvence f [Hz]				
			125	250	500	1000	1600
34	4 x 242V	21	0,045	0,108	0,334	0,784	0,959
35		21	0,045	0,108	0,338	0,77	0,943
36		21	0,044	0,101	0,349	0,79	0,931
37		21	0,042	0,105	0,354	0,789	0,947
38	6 x 242V	32	0,088	0,198	0,628	0,865	0,856
39		32	0,088	0,175	0,654	0,872	0,852
40		32	0,086	0,213	0,64	0,842	0,836
41		32	0,084	0,186	0,61	0,862	0,848
42	51315VT	13	0,016	0,038	0,087	0,247	0,469
43		13	0,016	0,04	0,091	0,248	0,476
44		15	0,018	0,044	0,104	0,286	0,537
45		13	0,017	0,036	0,086	0,232	0,451
46		15	0,017	0,041	0,101	0,28	0,523
47		13	0,015	0,038	0,09	0,244	0,473
48	51315VT	27	0,032	0,1	0,28	0,706	0,956
49		27	0,036	0,103	0,299	0,721	0,956
50		27	0,032	0,096	0,275	0,684	0,947
51		27	0,032	0,091	0,263	0,658	0,932
52		27	0,036	0,112	0,321	0,75	0,964
53		27	0,032	0,094	0,272	0,673	0,938
54	4 x 131HT	15	0,036	0,074	0,263	0,684	0,879
55		15	0,033	0,07	0,251	0,657	0,871
56		15	0,036	0,074	0,264	0,669	0,858
57	8 x 131HT	29	0,092	0,199	0,48	0,572	0,635
58		30	0,1	0,215	0,552	0,625	0,672
59		30	0,083	0,176	0,539	0,604	0,65
60		30	0,089	0,2	0,539	0,609	0,652
61	52425VT	14	0,021	0,047	0,128	0,378	0,669
62		14	0,021	0,044	0,116	0,343	0,621
63		14	0,019	0,042	0,116	0,343	0,626
64		14	0,021	0,046	0,126	0,373	0,659
65		14	0,021	0,043	0,118	0,361	0,645
66		14	0,018	0,045	0,124	0,369	0,659

Pokračování tab. 1 (příloha 4):

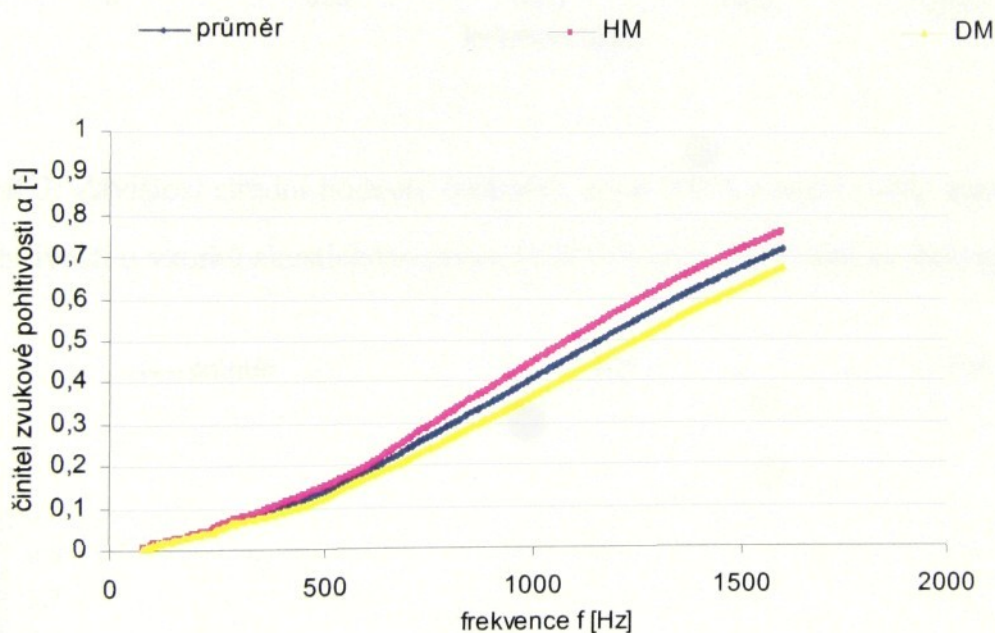
Číslo vzorku	Složení	Tloušťka [mm]	Činitel zvukové pohltivosti α [-]				
			Frekvence f [Hz]				
			125	250	500	1000	1600
67	52425VT	28	0,067	0,205	0,434	0,836	0,882
68		27	0,056	0,17	0,378	0,82	0,892
69		26	0,047	0,142	0,339	0,804	0,914
70		28	0,055	0,167	0,397	0,824	0,898
71		28	0,058	0,178	0,407	0,84	0,903
72	4 x 242HT	19	0,031	0,068	0,247	0,629	0,893
73		20	0,032	0,077	0,254	0,645	0,9
74		20	0,029	0,064	0,229	0,592	0,86
75		19	0,032	0,067	0,226	0,588	0,863
76	6 x 242HT	31	0,059	0,127	0,493	0,842	0,899
77		31	0,065	0,143	0,539	0,849	0,884
78		33	0,067	0,136	0,554	0,869	0,896
79		33	0,083	0,166	0,594	0,779	0,8

Příloha 5

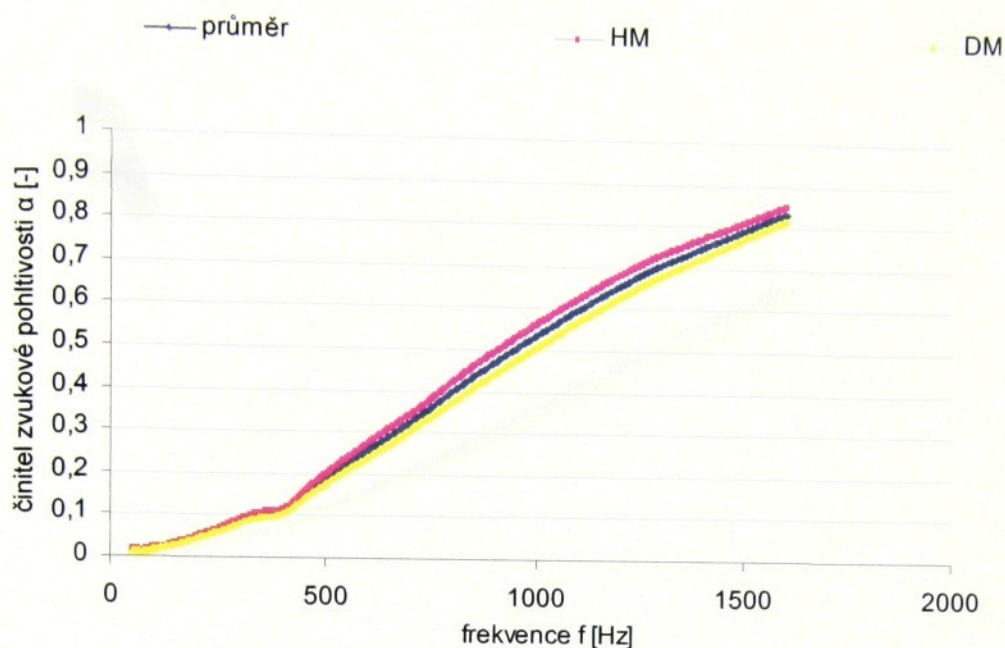
Statistické vyhodnocení činitelů zvukové pohltivosti α vzorků vertikální konstrukce

V následujících grafech jsou zobrazeny střední hodnoty (průměr) činitelů zvukové pohltivosti α akustických prvků a jejich dolní (DM) a horní (HM) meze prezentované 95% intervalem spolehlivosti v závislosti na frekvenci f .

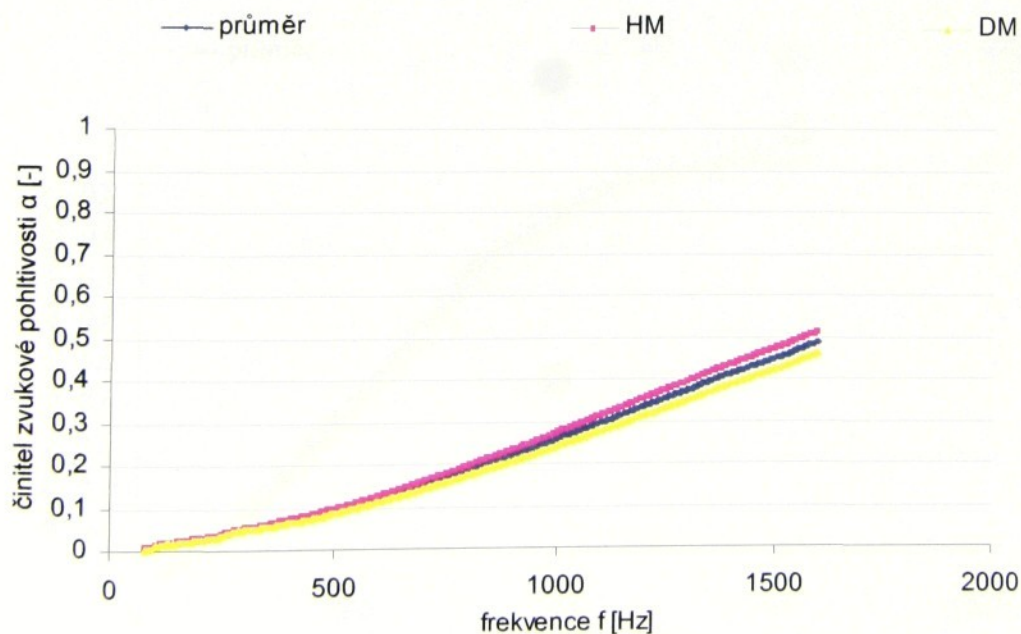
Graf 1: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 51315V ($\bar{t} = 15,33$ mm) na frekvenci f .



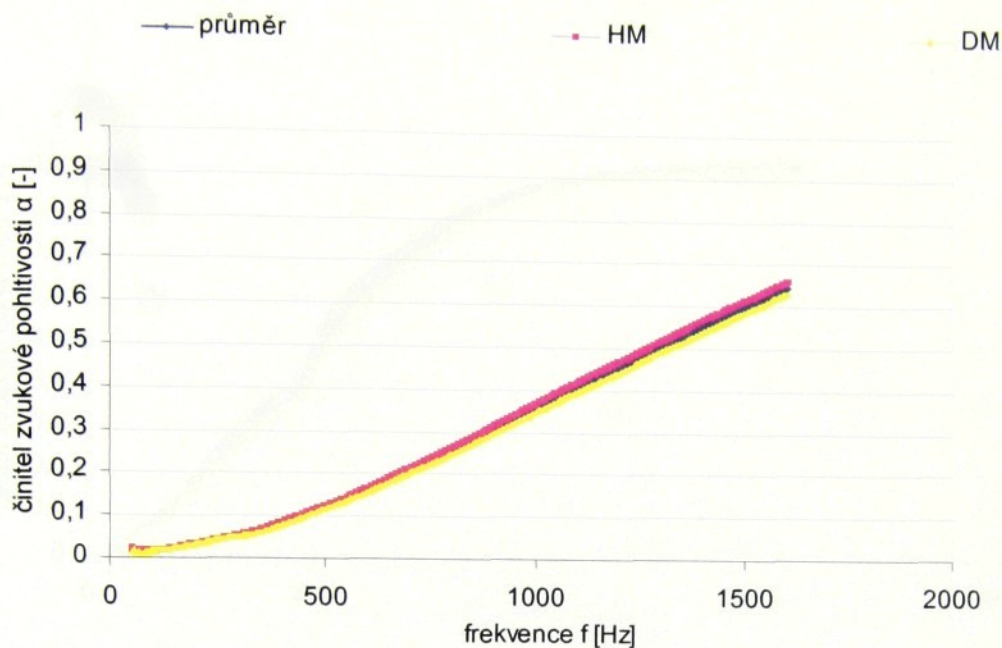
Graf 2: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 52425V ($\bar{t} = 16,5$ mm) na frekvenci f .



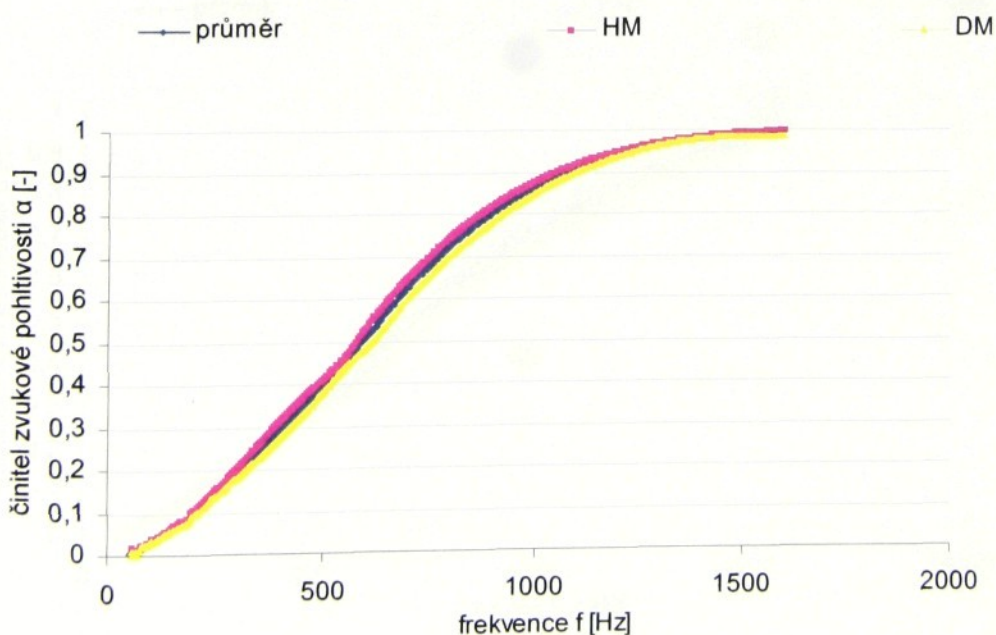
Graf 3: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 51315VT ($\bar{t} = 13,67$ mm) na frekvenci f .



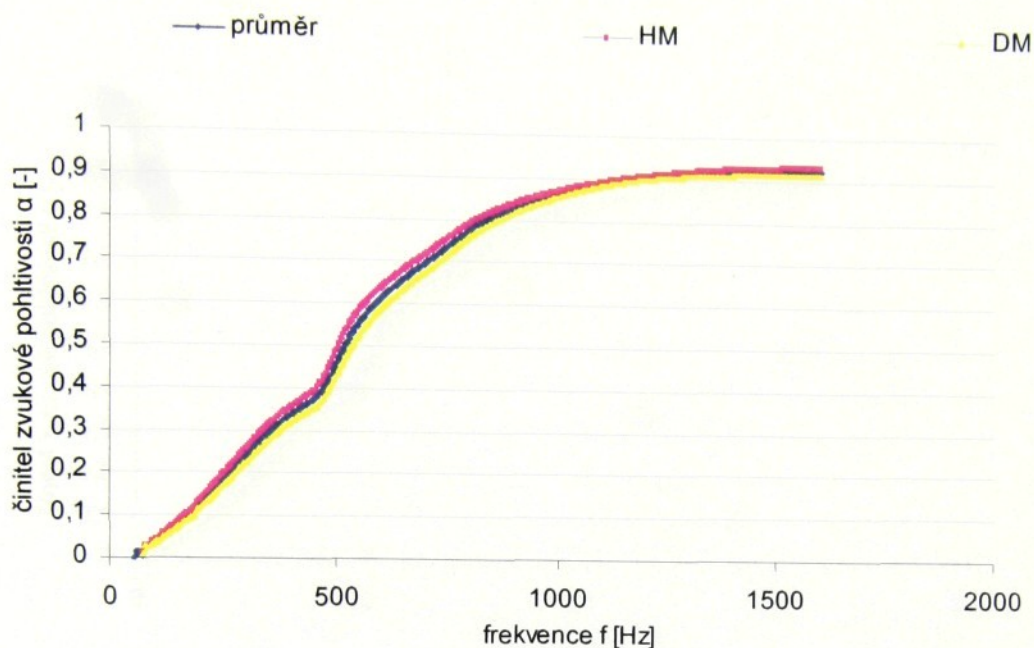
Graf 4: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 52425VT ($\bar{t} = 14$ mm) na frekvenci f .



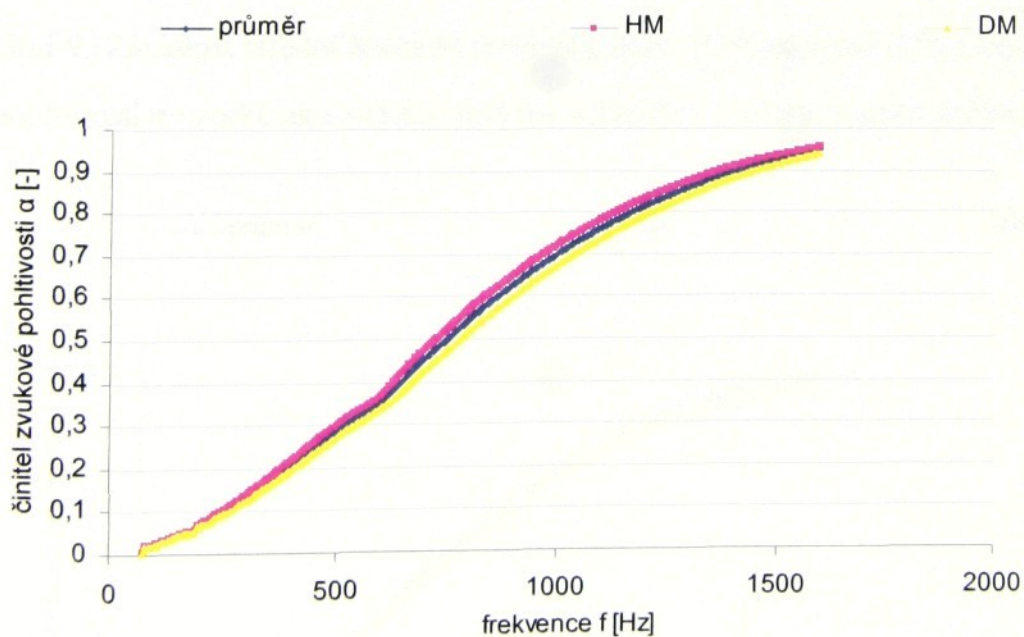
Graf 5: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 51315V ($\bar{t} = 31,8$ mm) na frekvenci f .



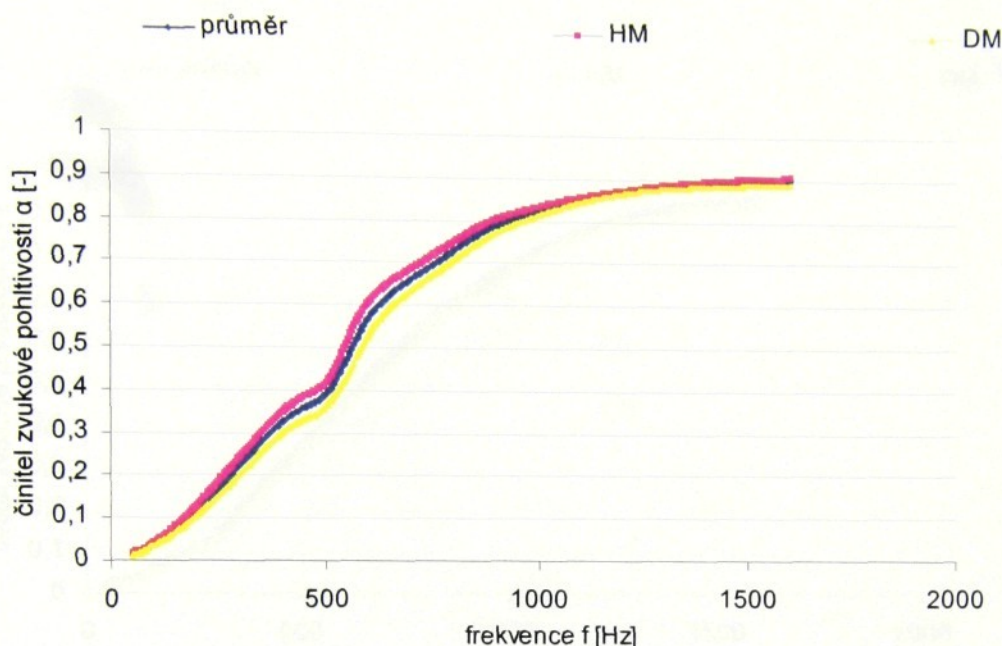
Graf 6: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 52425V ($\bar{t} = 29,83$ mm) na frekvenci f .



Graf 7: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 51315VT ($\bar{t} = 27$ mm) na frekvenci f .

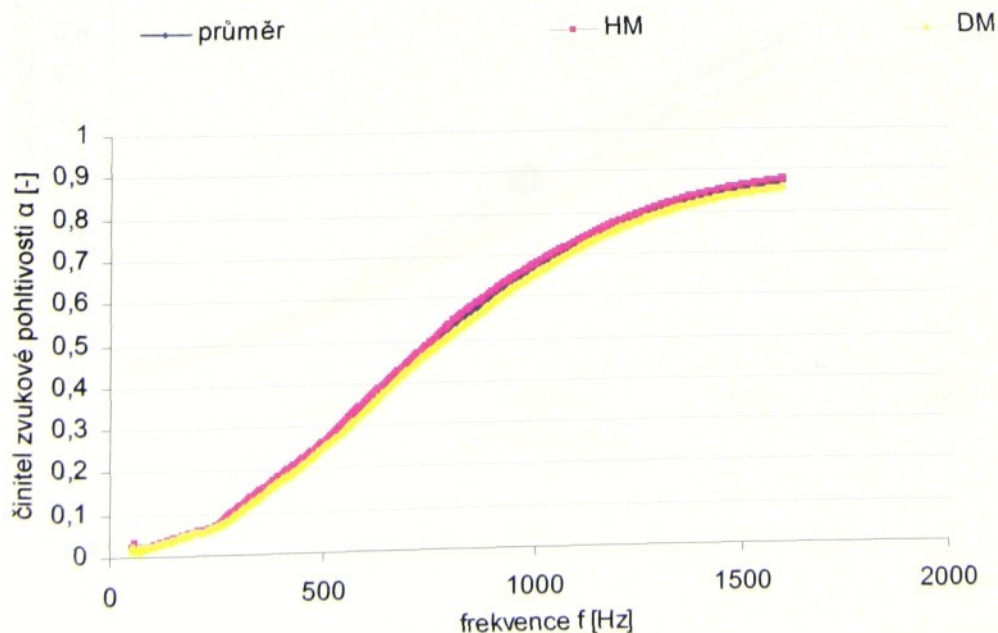


Graf 8: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 52425VT ($\bar{t} = 27,4$ mm) na frekvenci f .

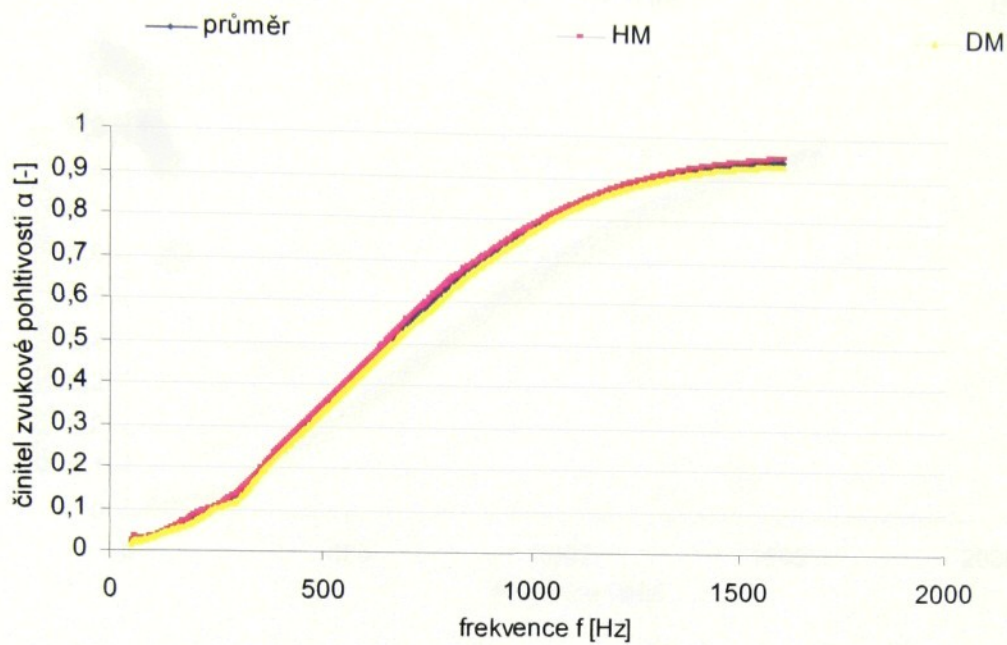


Statistické vyhodnocení činitelů zvukové pohltivosti α vzorků horizontální konstrukce

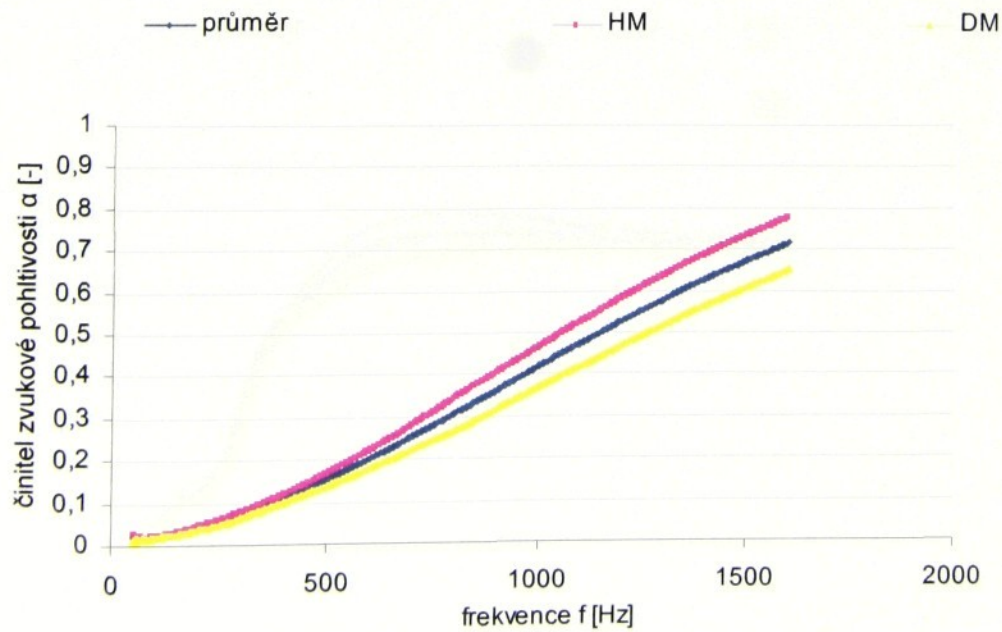
Graf 9: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 4 x 131H ($\bar{t} = 16,33$ mm) na frekvenci f .



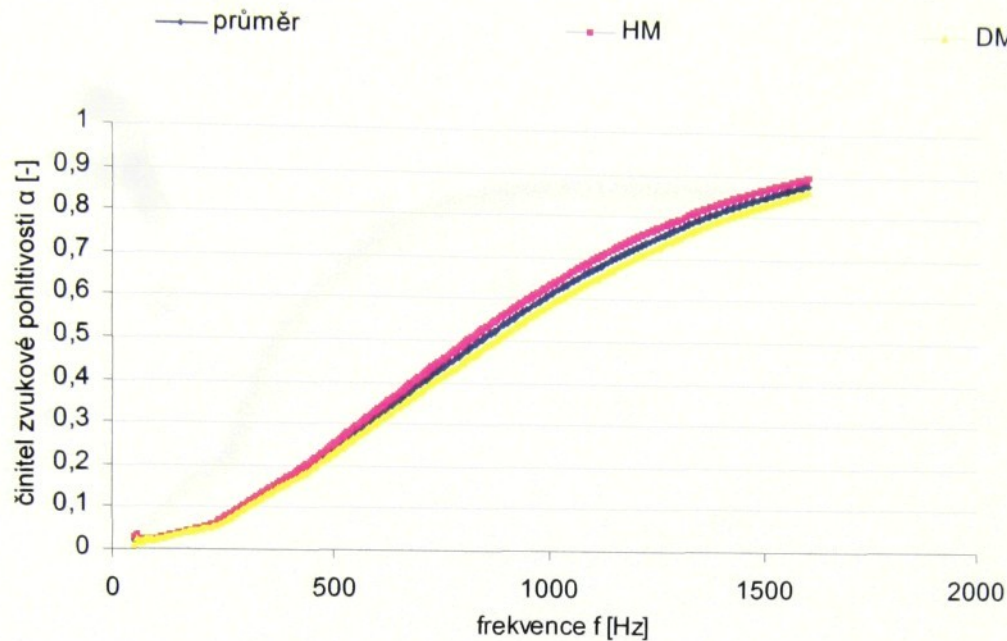
Graf 10: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 4 x 242H ($\bar{t} = 21$ mm) na frekvenci f .



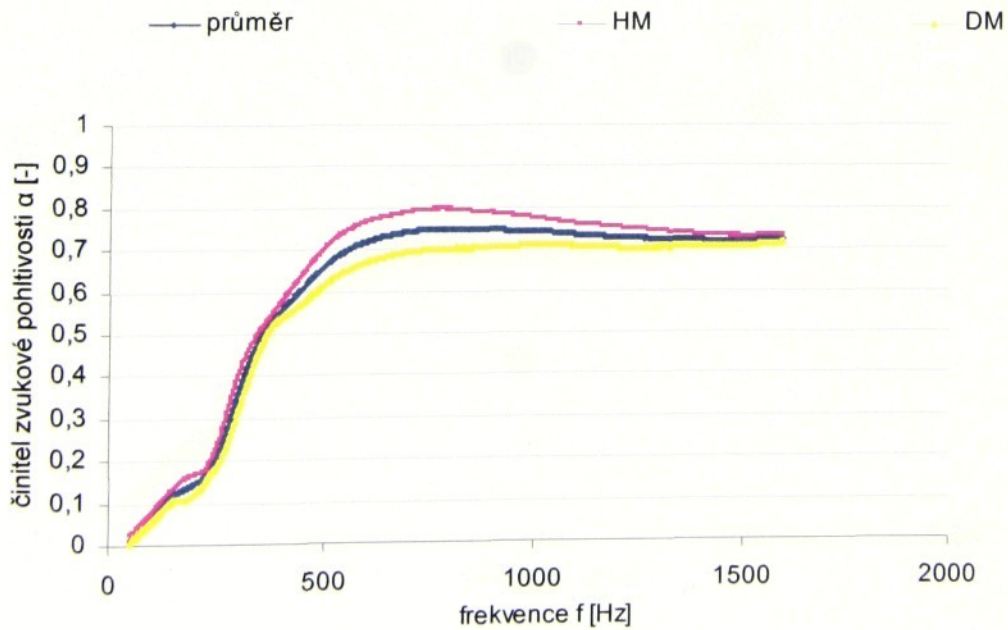
Graf 11: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 4 x 131HT ($\bar{t} = 15$ mm) na frekvenci f .



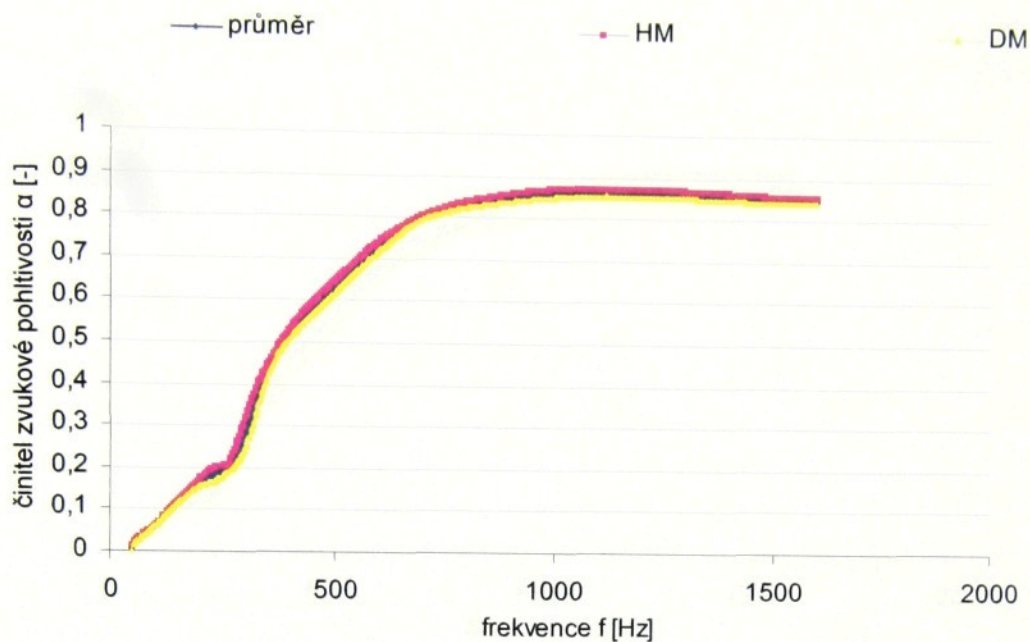
Graf 12: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 4 x 242HT ($\bar{t} = 19,5$ mm) na frekvenci f .



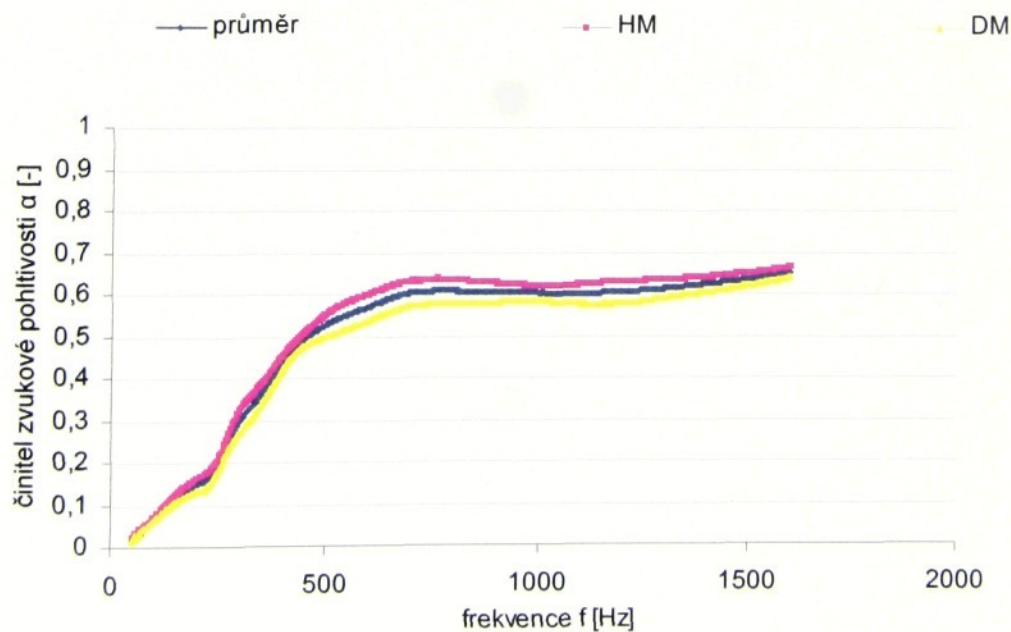
Graf 13: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 8 x 131H ($\bar{t} = 31,6$ mm) na frekvenci f .



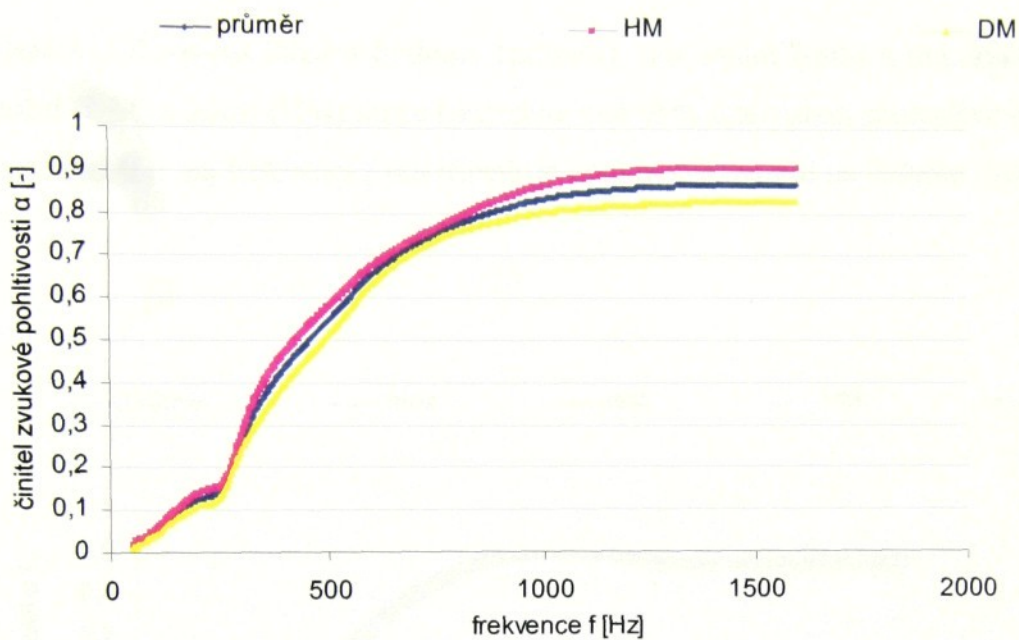
Graf 14: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 6 x 242H ($\bar{t} = 32$ mm) na frekvenci f .



Graf 15: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 8 x 131HT ($\bar{t} = 29,75$ mm) na frekvenci f .



Graf 16: Závislost střední hodnoty (průměr), dolní (DM) a horní (HM) meze činitele zvukové pohltivosti α vzorků akustického prvku 6x 242HT ($t = 32$ mm) na frekvenci f .



Statistické vyhodnocení změny činitele zvukové pohltivosti α pro třicetkrát opakované měření na jednom vzorku

Graf 17: Závislost střední hodnoty (průměr), minimální (min) a maximální (max) hodnoty, dolní (DM) a horní (HM) meze (prezentované 95% intervalem spolehlivosti) činitele zvukové pohltivosti α na frekvenci f pro třicetkrát opakované měření na jednom vzorku.

