

MATERIÁLY PRO SNIŽOVÁNÍ HLUKU A VIBRACÍ

**LUBOMÍR LAPČÍK, JR., VLADIMÍR CETKOVSKÝ,
BARBORA LAPČÍKOVÁ a STANISLAV VAŠUT**

Ústav fyziky a materiálového inženýrství, Fakulta technologická ve Zlíně, Vysoké učení technické v Brně, nám. T. G. Masaryka 275, 762 72 Zlín, e-mail: lapcik@zlin.vutbr.cz

Došlo dne 15.III.1999

Klíčová slova: vibrace, hluk, tlumení, polyurethany, hydroxy-
lem končený polybutadien

Obsah

1. Úvod
2. Fyzikální veličiny
 - 2.1. Vyzařování zvuku
 - 2.2. Vzduchová neprůzvučnost
3. Základní konstrukční typy zvukové a vibračně pohltivých materiálů
 - 3.1. Zvukové absorpční lamináty
 - 3.2. Kompozitní vlasové smyčkové materiály
 - 3.3. Skeletové deskové systémy
 - 3.4. Planární panelové systémy s proměnnou tloušťkou vzduchové mezery
 - 3.5. Volně sypané částicové systémy
 - 3.6. Sendvičové pěnové kompozitní systémy
 - 3.7. Sendvičové kompozity s tvarovanými kanálky (drážkami) nebo bez nich
 - 3.8. Sítované polymerní systémy
 - 3.9. Protihlukové bloky
4. Závěr

1. Úvod

Zvuk je akustické vlnění o frekvenci 10 Hz až 16 kHz. Akustické vlnění se šíří směrem od zdroje ve všech směrech. Místa, do nichž dospělo vlnění ze zdroje za stejnou dobu, tvoří tzv. vlnoplochy, přičemž tato místa v daném okamžiku kmitají se stejnou fází. Podle přístupu k problematice snižování hlučnosti lze rozlišit následující metody:

- Metoda redukce – snížení hlučnosti samotného zdroje hluku, např. při konstrukci zařízení.
- Metoda zvukové izolace – obklopení zdroje zvuku materiálem s co nejvyšším stupněm neprůzvučnosti.
- Metoda zvukové pohltivosti – snahou je, aby ta část zvuku, která se při dopadu na stěnu odráží zpět, byla co nejmenší, tj. aby izolační materiál pohlcovatel co největší část dopadající energie.

V našem případě jde o přípravu materiálu zvukové pohltivého; přiblížíme si tedy základní principy procesů probíhající v průběhu absorpce zvukové energie. V matici zvuko-

vě-vibračně tlumícího materiálu dochází k disipaci zvukového vlnění na mechanickou energii a teplo. To se děje kombinací následujících procesů:

- Tření rozkmitaných částic vzduchu o stěny při jejich vnikání do pórů pohltivého materiálu. Tím dochází ke snižování kinetické energie dopadajícího zvukového pole. Efektivita tohoto procesu se zvyšuje se zvyšující se porozitou absorpčního materiálu.
- Snižování potenciální energie zvukové vlny vnikající do materiálu. Tím dochází ke snížení akustického tlaku, což může být způsobeno výměnou tepla mezi vzduchem a skeletem pohltivého materiálu při periodických tlakových změnách.
- Nepružná deformace tělesa pohltivého materiálu.

Při cílené konstrukci vibračně nebo hlukově-izolačního materiálu je proto možné využít všech výše uvedených procesů k jejich synergickému působení pro dosažení maximální účinnosti tlumení. Toho lze dosáhnout jednak volbou geometrie dotýčného tělesa, jednak výběrem vhodné nosné matrice a pojidla. Jedním z vhodných systémů je např. recyklovaná pryž pojená elastomery na bázi kapalných polybutadienů. Vhodnou volbou molární hmotnosti a koncových skupin polybutadienu, jakož i výběrem síťovadla lze regulovat molekulární parametry výsledného elastomeru, totiž hustotu polymerní sítě a délku volných segmentů, a tím i komplexní složku dynamického modulu pružnosti, který ovlivňuje zvukovou pohltivost.

2. Fyzikální veličiny

Pohltivé vlastnosti materiálu nebo celé konstrukce vyjadřuje koeficient zvukové pohltivosti α :

$$\alpha = \frac{P_p}{P_{\text{dop}}} \quad (1)$$

kde P_p je pohlcený akustický výkon a P_{dop} je celkový dopadající výkon. Pro případ kolmo dopadajícího zvuku se definuje normálový koeficient zvukové pohltivosti α_n :

$$\alpha_n = \frac{(4r/\rho c)}{\left(\frac{r}{\rho c} + 1\right)^2 + (x/\rho c)^2} \quad (2)$$

kde $r/\rho c$ je akustický odpor (reálná část akustické impedance), $x/\rho c$ akustická reaktance (imaginární část akustické impedance). ρc je charakteristická impedance vzduchu, která obecně závisí na rychlosti šíření vzruchu prostředím, c . Rychlost šíření vzruchu je závislá na hustotě prostředí ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), teplotě T ($^{\circ}\text{C}$) a dalších veličinách. Tak např. pro vzduch o teplotě 0°C a tlaku 10^5 Pa je rychlost šíření vzruchu $332\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; pro teplotu -20°C a tlak 10^5 Pa je tato rychlost $319\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (cit. 1).

Charakteristiky zvukové pohltivosti pórovitých izolačních materiálů jsou závislé na akustické impedanci materiálu. Akus-

tická impedance (Z_a) je komplexní veličina, která se skládá z frekvenčně závislých složek akustického odporu a akustické reaktance a je definována jako komplexní podíl akustického tlaku a objemové rychlosti:

$$Z_a = \frac{p}{q} \quad (3)$$

Akustický tlak p je definován jako rozdíl mezi tlakem a statickým tlakem (statický tlak je časově průměrovaným tlakem prostředí). Objemová akustická rychlost q (neboli tok akustické rychlosti) je definován jako časová změna objemové akustické výchylky.

Akustická reaktance pórovitých izolačních materiálů je určována tloušťkou vrstvy a – v mnohem menší míře – plošnou hustotou vzduchově propustného povrchového filmu, kterým je pokryt povrch těchto materiálů. Akustický odpor (neboli akustická rezistance) pórovitého izolačního materiálu je určována odporem vůči průtoku vzduchu materiálem. Pro danou hodnotu akustické reaktance existuje optimální hodnota akustického odporu, při které se dosahuje nejvyšší zvukové pohltivosti. Protože reaktance pórovitého izolačního materiálu je určována hlavně tloušťkou vrstvy, je nastavení akustického odporu neefektivnějším způsobem regulace zvukové pohltivých vlastností pórovitých materiálů. Toto lze ovlivnit např. snížením průměrné velikosti pórů (tj. zvýšením objemové hustoty materiálu), zvýšením obsahu pojiva, různou perforací apod. Nevýhodou tohoto přístupu je nárůst materiálových nákladů, a tím i prodejní ceny finálního produktu.

2.1. Vyzařování zvuku

Akustický výkon vyzařený povrchem kmitající desky plochy S lze vyjádřit vztahem²:

$$P = v^2 \rho_0 c_0 S s \quad (4)$$

kde v je efektivní rychlost kmitání desky, ρ_0 – hustota prostředí, do něhož je zvuk vyzařován, c_0 – rychlost šíření zvuku v tomto prostředí (v našem případě ve vzduchu), s je činitel vyzařování zvuku. Rozlišujeme vlnění podélné – longitudinální a vlnění příčné – transversální. Toto se pak dělí na vlnění torzní, ohybové a povrchové (Rayleighovo vlnění). U pístové kmitající desky je tento činitel $s = 1$ a nezávisí na materiálu desky. Obvykle však desky kmitají ohybově. Pro nekonečně velkou desku ohybově kmitající s frekvencí f pak z teorie vyzařování zvuku plyne

$$s = \sqrt{1 - f_{kr}/f} \quad (5)$$

kde

$$f_{kr} = c_0^2 / (1,8 \cdot c_L \cdot h) \quad (6)$$

je tzv. kritická frekvence. V rovnici (6) značí h tloušťku desky a c_L je rychlost podélných vln v desce. Ta je dána vztahem:

$$c_L = \sqrt{\frac{E^{**}}{\rho}} \quad (7)$$

v němž ρ je hustota materiálu desky a E^{**} je cylindrický modul pružnosti desky určený rovnicí:

$$E^{**} = \frac{E}{1 - \nu_p^2} \quad (8)$$

kde E je modul pružnosti v tahu materiálu desky a ν_p Poissonovo číslo daného materiálu.

Ze vztahu (5) vyplývá, že v oblasti frekvencí menších než je kritická frekvence nedochází k vyzařování zvuku (s je imaginární). Deska vyzařuje zvuk teprve nad kritickou frekvencí, při níž je vyzařování zvuku teoreticky nekonečně velké. V případě konečných rozměrů však deska vyzařuje i v podkritické oblasti frekvencí, ale podstatně méně než nad kritickou frekvencí. To tedy znamená, že je výhodné z důvodu maximálního tlumení navrhnout takový materiál desky, aby její kritická frekvence ležela nad budící frekvencí při požadované tloušťce desky.

2.2. Vzduchová neprůzvučnost

Schopnost dělicího prvku bránit přenosu zvuku šířícího se vzduchem se nazývá vzduchová neprůzvučnost a její velikost se vyjadřuje stupněm vzduchové neprůzvučnosti

$$R = 10 \log \frac{P_d}{P_{pr}} \quad (9)$$

kde P_d značí dopadající akustický výkon a P_{pr} akustický výkon prošlý dělicím prvkem. U jednoduchých dělicích prvků dochází v důsledku koincidence k poklesu vzduchové neprůzvučnosti ve frekvenční oblasti nad kritickou frekvencí, přičemž tento pokles je nejvýraznější při kritické frekvenci. Z toho je zřejmé, že jak z hlediska vyzařování zvuku, tak i z hlediska vzduchové neprůzvučnosti je žádoucí, aby kritická frekvence ležela mimo oblast budící frekvence a pokud možno co nejvýše nad ní.

3. Základní konstrukční typy zvukové a vibračně pohltivých materiálů

Na následujícím schématu 1 jsou znázorněny nejběžnější typy konstrukce zvukové a vibračně pohltivých systémů. Jedná se zejména o různé typy laminátů^{3,4} (a), kompozitních vlasových smyčkových materiálů⁵ (b), skeletových deskových systémů⁶ (c), planárně panelových systémů s proměnnou tloušťkou vzduchové mezery⁷ (d), volně sypaných částicových systémů^{2,8-11} (e), sendvičové pěnových kompozitních systémů¹² (f), sendvičových kompozitů s tvarovanými kanálkami (drážkami) nebo bez nich (g), síťovaných polymerních systémů¹⁴ (h) a protihlukových bloků¹⁵⁻²¹.

3.1. Zvukově absorpční lamináty

Tyto systémy se vyznačují vysokou účinností útlumu při poměrně malé tloušťce vrstvy. Proto mají nejširší využití zejména v oblasti stavebnictví (vnitřní interiérové úpravy) a dopravy. Lamináty se skládají z pórovitého izolačního substrátu (např. z polymerní vláknové matrice nebo z plátu pěnové polymerní gumy) a povrchové tenké vrstvy s vysokým odpo-

rem vůči průtoku vzduchu³ (viz schéma 1). Zmíněná povrchová vrstva, která plní jednak zvukově izolační, jednak estetickou funkci, je přilepena k povrchu pórovitého substrátu pro zvýšení jeho zvukově pohltivých charakteristik. Při tomto konstrukčním uspořádání je odpor vůči průtoku vzduchu větší než případě samotného substrátu, a laminát má tak vyšší hodnotu koeficientu zvukové pohltivosti a navíc i lepší mechanické a pevnostní charakteristiky.

Jako příklad lze uvést patent Hainese a Flayea³, kde je jako povrchový materiál regulující průtok vzduchu systémem po-

užit papír, textilie, nebo perforovaný polymerní film. Jako pórovitá matrice byly použity systémy na bázi skleněných nebo polymerních vláken, případně polymerních pěnových materiálů.

Pomocí vztahů (10)–(12) je možné určit akustický odpor a akustickou reaktanci pro obě komponenty, a tak rozhodnout, zda povrchová vrstva (folie) může zvýšit akustické izolační parametry (odpor vůči průtoku vzduchu) nad mez, nutnou pro dosažení žádoucích hodnot koeficientu zvukové pohltivosti. Pro samotný substrát platí

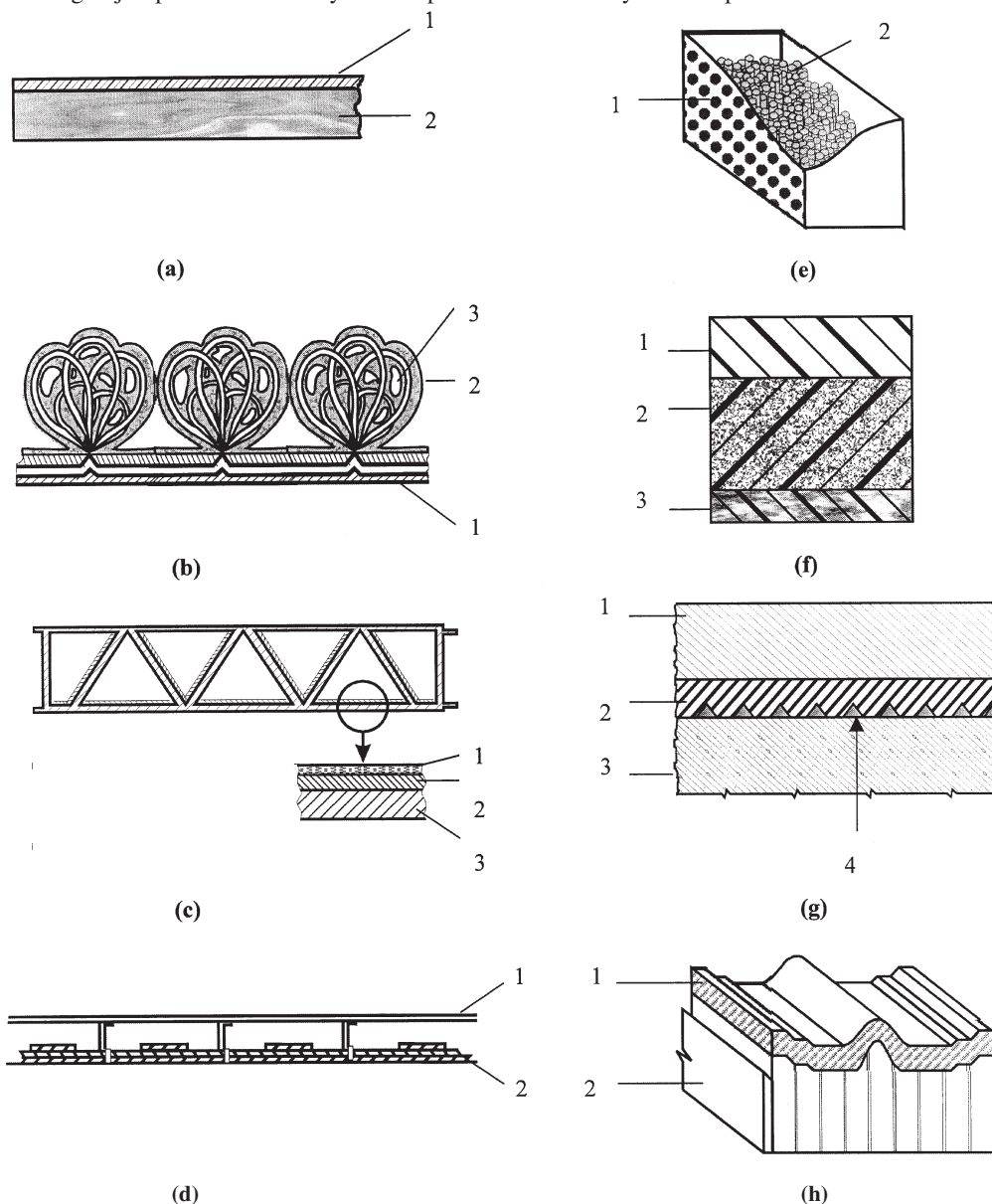


Schéma 1. Nejběžnější typy konstrukce zvukové a vibračně pohltivých systémů. (a) lamináty: 1 – perforovaný polymerní film, 2 – vata ze skleněných vláken; (b) kompozitní vlasové smyčkové materiály: 1 – podkladový materiál (např. PVC), 2 – polymerní vlákno pokryté elastomerem, 3 – prázdný prostor; (c) skeletové deskové systémy: 1 – povrchový polymerní film, 2 – pryžová vrstva tlumící vibrace, 3 – kovová nosná konstrukce; (d) planární panelové systémy s proměnnou tloušťkou vzduchové mezery: 1 – betonový panel, 2 – sádkarton; (e) volně sypané částicové systémy: 1 – polymerní fólie, 2 – drcená recyklovaná pryž; (f) sendvičové pěnové kompozitní systémy: 1 – podkladový materiál, 2 – pěnový polymerní systém plněný např. síranem barnatým, 3 – povrchový tkaný materiál na bázi syntetických vláken; (g) sendvičové kompozity s tvarovanými kanálky (drážkami) i bez nich: 1 – povrchová podlahová vrstva (např. parkety), 2 – tlumící materiál na bázi recyklované pryže, 3 – betonová podkladová vrstva, 4 – tvarované kanálky; (h) síťované polymerní systémy: 1 – lisovaná tlumící vrstva, 2 – podkladový materiál

$$r_s = 3180 \cdot t \cdot \rho_s^{1.53} / d^2 \quad (10)$$

kde r_s je odpor substrátu vůči průtoku vzduchu (rozměr N.s.m⁻⁴), ρ_s je hustota skleněného vlákna (pórovitého substrátu) (kg.m⁻³), d střední průměr skleněných vláken (μm), t je tloušťka izolační vrstvy (m). Akustický odpor laminátu ($r_L / \rho c$) se vypočítá dle vztahu (11):

$$r_L / \rho c = (r_s + r_f) / \rho c \quad (11)$$

kde $r_f / \rho c$ je akustický odpor povrchové vrstvy. Akustickou reaktanci ($x / \rho c$) můžeme vypočítat podle vztahu:

$$x / \rho c = \frac{-1}{\tan(2fL/c)} \quad (12)$$

kde f je frekvence (Hz), L vzdálenost mezi povrchovou vrstvou pórovitého substrátu a zadní neprůzvučnou stěnou (m), c rychlost zvuku (m.s⁻¹). Pro danou frekvenci platí mezi reálnou hodnotou odporu pro zvukově pohltivý laminát ($r_L / \rho c$) a akustickou reaktancí vztah:

$$r_L / \rho c = \sqrt{(1 + (x / \rho c))^2} \quad (13)$$

V dalším patentu⁴ bylo při výrobě zvukově izolačního laminátu použito pojivo na bázi epoxidové pryskyřice modifikované polybutadienovým elastomerem obsahujícím nejméně 90 mol.% 1,2-vázaných monomerních jednotek. Jako vláknová složka laminátu byla použita tkanina na bázi polyethylenových vláken. Tímto způsobem připravený laminát pak vykazoval lepší zvukově izolační vlastnosti při pokojové teplotě než v případě použití 1,4-vázaného elastomeru.

3.2. Kompozitní vlasové smyčkové materiály

Tyto materiály mají zvýšený odpor vůči smykovému namáhání a dvojí funkci: tlumí rázy a zároveň zvukově izolují. Do prostoru mezi vlákna poměrně tvrdých polymerů⁵ (viz schéma 1(b)) se aplikuje kapalný polymerní elastomer takovým způsobem, aby se v matrici vláken vytvořily makroskopické dutiny za současného vzniku kompaktní povrchové vrstvy. Tímto způsobem se dosahuje synergického účinku hookovské elasticity pružných vláken tkaniny a viskoelasticity a plasticity elastomeru. Jako elastomer může být použita termoplastická kapalina, např. latex (přírodní, neoprenový, akrylonitril-butadienový, methylmetakryl-butadienový, některé z polyakrylátových), emulze (polyvinylacetátová, ethylen-vinylacetátová, polyesterová, polyuretanová, vinylová), polyvinylchlorid, polypropylen, nebo bitumenový základ. V této oblasti je možné využít kapalného kaučuku¹¹ (Kaučuk, a.s.). Jako pevná vlákna mohou být využity organické materiály, jako např. dřevěná vlákna, která mohou vytvořit trojrozměrnou propletenou strukturu. V technologickém reglementu se podle použitých komponent dále využívají různé typy zúšlechťovacích a stabilizačních přípravků (disperzanty, stabilizátory, antioxidanty a pod.).

3.3. Skeletové deskové systémy

Podpěrná trámová konstrukce je tvořena dvěma hliníkovými deskami (viz schéma 1(c)) a křížovými hliníkovými podpěrnými nosníky. Vibračně pohltivá vrstva se deformuje v kolmém směru na vnitřní plochy podpěrných nosníků a vnitřní stranu spodní deskové podpěry. Tímto uspořádáním se dosahuje tlumení proměnou vibračního pohybu na tepelnou energii. Při vlastní výrobě je nutno dosáhnout maximální adheze antivibračního materiálu k povrchu hliníkové konstrukce, s co možná nejvyšším obsahem vzduchových bublin⁶. Tímto způsobem je možné vyrobit plošné segmenty, které účinně tlumí vibrace a jsou vhodné pro konstrukci různých dopravních prostředků, zejména velmi rychlých vlaků. U vzorku je uváděno snížení hladiny hluku o 19–33 dB při frekvencích nad 630 Hz. Při frekvencích pod 500 Hz má tento systém poměrně nízkou tlumící charakteristiku, a to jen 6 dB. Jako tlumícího materiálu bylo použito skleněné vaty lepené plastickým lepidlem (tzv. gumoasfaltem nebo speciálním syntetickým butylkaučukem roztaveným při 130–150 °C).

3.4. Planární panelové systémy s proměnnou tloušťkou vzduchové mezery

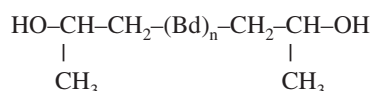
Konstrukční schéma těchto typů protihlukových zábran je znázorněno na schématu 1(d). Z obrázku je patrné, že tyto panely se skládají z vodících paralelních kovových (plastových) lišt, pokrytých jednou nebo více vrstvami materiálu (např. dřevotřískou, dřevem, sklem, styropěnou, sádkokartónem apod.), čímž se dosahuje proměnné tloušťky vzduchové vrstvy. Pro tyto materiály jsou charakteristiky zvukové neprůzvučnosti důležitější než charakteristiky zvukové pohltivosti. Změnou tloušťky vzduchové mezery je možné tento systém patřičně naladit na požadované frekvenční hodnoty maxima zvukové pohltivosti. Bylo zjištěno, že příčný přenos zvuku panelem je způsoben zejména následujícími dvěma přenosovými mechanismy. Zaprvé, interakcí mezi panelem a uzavřeným objemem vzduchu v mezeře, tzv. „náhodným efektem“. Zadruhé, vlastní rezonancí panelu (a s ní spojené harmonické vibrace), která vede ke vzniku řady kritických frekvencí ve vyšším frekvenčním pásmu. Tímto způsobem je možné rozložit příslušné zvukové spektrum na několik kritických frekvencí o celkově nižší hodnotě zvukové energie než v případě jednoho intenzivního maxima⁷. Pro dosažení tohoto efektu se kromě tloušťky vzduchové mezery může měnit i tloušťka vlastního panelu. To se provádí již při konstrukci tak, že vlastní panel je složen z několika vrstev tvořících laminátovou konstrukci a majících v řezu trojúhelníkovou strukturu (např. pyramidální).

3.5. Volně sypané částicové systémy

Na výrobu těchto hlukově pohltivých systémů je možno použít např. drcenou recyklovanou pryž o různé zrnitosti, získanou z ojetých pneumatik⁸ (viz schéma 1(e)). Uváděné hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti se v závislosti na tloušťce vrstvy (25–90 mm) pohybují v rozmezí 0,7–0,95, s maximy při frekvencích 1100, 2000 a 3000 Hz.

Do této kategorie je možno zahrnout systém na bázi drcené pryže (z recyklovaných ojetých pneumatik^{9,10}), jejíž částice

jsou spojeny vhodným pojivem¹¹. U těchto systémů se dosahuje zlepšení charakteristik zvukové pohltivosti tvarováním přední plochy pomocí řady děr ve tvaru rotačního elipsoidu. Jako nejvhodnější pojivové systémy se jeví takové polybutadieny, které jsou v důsledku své nízké molární hmotnosti kapalné, a které v různých modifikacích vyrábí např. Kaučuk group, a.s., pod obchodním názvem Krasol, jakož i polyurethany od těchto polybutadienů odvozené. Receptura přípravy kapalných polybutadienů (založená na aniontové polymerizaci) umožňuje variabilitu číselných průměrů molárních hmotností v rozmezí 1900 až 4000 g.mol⁻¹ (cit.²³). Např. makromolekulu skupinami OH končeného (tzv. hydroxyl-telechelického) polybutadienu (Krasolu LBH) lze schematicky znázornit takto:



kde Bd je butadienová monomerní jednotka, která je v řetězci přítomna ve třech izomerních formách (1,4-*cis*, 1,4-*trans* a 1,2). Reakcí koncových skupin OH tohoto polymeru s různými diisokyanáty (v přítomnosti nízkomolekulárních dvoj- resp. vícefunkčních alkoholů nebo aminů, tj. extenderů, resp. síťovaadel) vzniká polyurethan²³.

Z výše uvedeného je patrné, že u těchto materiálů lze měnit velký počet molekulárních parametrů, což umožňuje selektivně naladit příslušný tlumicí systém podle požadované kritické frekvence první rezonance (např. vhodnou volbou diisokyanátu, extenderu, a prostřednictvím síťovaadla též volbou hustoty polymerní sítě). Hodnota vzduchové neprůzvučnosti *R* (rovnice (9)) se pohybuje u těchto materiálů v rozmezí 43 až 46 dB (cit.²⁴) (při tloušťce vrstvy 40 mm), kritická frekvence první rezonance v oblasti 2 kHz (cit.²⁵).

Podobně jako v předcházejících příkladech kompozitů z partikulární pryže, i v těchto aplikacích je možné využít krátkovláknových polymerních kompozitů². Dosažené výsledky umožňují i predikci jejich akustických vlastností – schopnosti vyzařovat zvuk a vzduchové neprůzvučnosti. Tato problematika je aktuální v souvislosti s materiály vzniklými mechanickou recyklací vláknových polymerních kompozitů, při níž dochází ke zkracování vláken a tím i ke změnám v jejich mechanickém chování. V důsledku destrukce výztuže při recyklaci je již obtížné takovéto recykláty použít na dílce s vysokými nároky na pevnost. Lze je však aplikovat na méně namáhané části strojů či interiérů budov, jako jsou odkládací plochy, kryty pohybujících se mechanismů, kanály pro vzduchotechniku aj., které kmitají a tím vydávají hluk. Rovněž je možno využít recyklátů jako dělicích prvků (stěny, protihlukové zástěny, kryty motorů a pod.), kde hlavní užitečnou vlastností je vzduchová neprůzvučnost. Obě uvedené akustické vlastnosti – vyzařování zvuku a vzduchová neprůzvučnost – spolu úzce souvisejí a jsou určeny především mechanickými vlastnostmi materiálů.

3.6. Sendvičové pěnové kompozitní systémy

Schematicky jsou tyto materiály znázorněny na schématu 1(f). Základními konstrukčními prvky jsou: pěnový polymerní systém plněný partikulárním materiálem pohlcujícím zvuk, tenká bariérová vrstva. Jako podkladový materiál může (ale

nemusí) být použit takový materiál (např. na bázi skleněných vláken, nylonu a pod.), který jednak tlumí zvuk, jednak má např. samozhášející nebo teplovzdorné vlastnosti¹². Jako bariérová vrstva byl použit tuhý PVC plněný síranem barnatým o koncentraci 60 %. Jako alternativní materiály pro polymerní bariéru byly použity polyestery, polyethery, polyurethany, polyamidy či polyethyleny. Vlastní polymerní pěnová matrice byla tvořena různými polyurethany, silikony, polyestery, polyethery, polyamidy nebo polyethylenem a také plněna síranem barnatým společně s dutými skleněnými mikrokuličkami. Pro zlepšení užitečných optických vlastností mohou být obě vrstvy kompozitu přibarveny přidávkou různých pigmentů. Důležitou vlastností této pěnové matrice je struktura její vnitřní porozity, vyznačující se systémem otevřených a vzájemně propojených pórů.

3.7. Sendvičové kompozity s tvarovanými kanálky (drážkami) nebo bez nich

Tento materiál se využívá zejména na tlumení vibrací a kročejového hluku. Je vyroben z recyklované pryže z ojetých pneumatik. Skládá se z ploché vrchní vrstvy a tvarované spodní vrstvy do formy kanálků V- a U-tvaru, které jsou směřovány napříč plochou pod úhlem 45°. Tímto způsobem je snížena kontaktní plocha podkladového potěru (viz schéma 1(g)) s povrchovým potěrem v rozmezí 20–65 % vůči povrchové vrstvě podlahy¹³. Granulometrie použitých částic recyklované gumy poskytla maximální hodnotu průměru částic 2,5 mm. Pryžové částice byly dále tepelně a tlakově hněteny a formovány do výsledného bloku.

3.8. Síťované polymerní systémy

Výroba těchto systémů je založena na lisování vibračně a zvukově izolačních materiálů přímo do podoby tvarovek konkrétní části zařízení. Postup výroby spočívá v iniciaci termického síťování kapalné polymerní matrice přímo ve tvarovacím zařízení. Homogenní síťovací či polymerizační reakce se dosahuje použitím vstříkovaní horkého roztoku polymeru (monomeru) do formy pomocí suché přehřáté tlakové páry¹⁴. Největší využití těchto systémů je v automobilovém průmyslu. Jako síťovací systém byl použit fenolový novolak, fenol/formaldehydové, nebo čpavek/formaldehydové živice. Jako doplňky zvyšující užitečné vlastnosti mohou být přidány tkané nebo netkané látky přímo do lisované součástky.

3.9. Protihlukové bloky

Konstrukce těchto systémů je založena na využití geometrie tělesa sestaveného z neprůzvučného materiálu (např. betonu a pod.)¹⁵ a lze ji modifikovat přidávkou zvuk pohlcujícího částicového volně sypaného materiálu do volného objemu bloku¹⁶⁻²¹.

4. Závěr

Na základě výše uvedeného přehledu lze konstatovat, že pro konstrukci široké škály zvukově a vibračně izolačních systémů je výhodné využít odpadních polymerních materiálů

(zejména drcené pryže a plastů). To je však možné jenom po vhodné mechanické úpravě a separaci podle druhu, velikosti a tvaru částic recyklátů. Pro přípravu vlastního vibračně nebo zvukově izolačního systému je důležitý výběr vhodného pojiva. Vhodným systémem je např. polybutadien/polyurethanové pojivo odvozené od kapalného kaučuku Krasol LBH. Zvláštní pozornost při konstrukci a vlastní výrobě se musí věnovat také povrchové předúpravě drtě vzhledem ke zvýšení vzájemné adheze pojivo–částice.

Tato práce byla uskutečněna s podporou společnosti Kaučuk, a.s., Kralupy nad Vltavou (členem skupiny Unipetrol group) v rámci smlouvy o dílo ZČ 98-19 a výzkumného záměru FT Zlín č. CZT90015/99. Zvláštní poděkování patří dr. J. Po-dešvovi (ÚMCH AV ČR) za pečlivou redakční úpravu textu.

LITERATURA

1. Smetana, C., v knize: *Hluk a vibrace. Měření a hodnocení* (Smetana C., ed.), kap. 1. Sdělovací technika, Praha 1998.
2. Vašut S., Šuba O.: *Plasty Kauc.* 35, 262 (1998).
3. Haines J. C., Fay R. M. (Schuller International, Inc., Denver, USA): WO 97/04445.
4. Tokura K., Uryu M., Matsuura S. (Sony Corporation, Tokyo, Japan): US 5663220.
5. Kishi S. (Reittec Co., Ltd., Yao, Japan): US 5654065.
6. Hatayama T., Yamagiwa I., Maekawa K., Iwai K., Tanaka T., Taniuchi M., Sanuki R., Ueki I., Sasaki T., Sugimoto A., Fujisawa K. (Kabushiki Kaisha Kobe Seiko Sho, Kobe, Japan): US 5690035.
7. Mackenzie R. K. (Edinburgh Acoustical Company, Ltd., Edinburgh, UK): WO 97/33051.
8. Pfretzschner S. J., Simon H. F., Moreno A. A., Colina T. C. (Consejo Superior Investigaciones Cientificas, Madrid, Spain): WO 97/24492.
9. Fleischhacker G.: WO 97/47817.
10. Porter A. G.: WO 97/44220.
11. Medlín J.: CZ 9601268.
12. Veiga M. J., Satin R. J. (Bradford Industries, Inc., Lowell, USA): US 5622662.
13. Ducharme R. (Royal Mat International, Inc., Beauce, Canada): WO 98/21027.
14. Cavalloni C., La Grotteria A., Freyer H. (Matec Holding, A. G., Kunsnacht, Switzerland): US 5696201.
15. Vondross K. L. (Best Block Company, Butler, USA): US 5700983.
16. Briš P., Vašut S., Fišer V.: *J. Building Acoustics* 4, 223 (1997).
17. Vašut S., Briš P., Mikulica A.: *Užitný vzor*, CZ 9500321.
18. Vašut S., Briš P., Lapčík Jr. L., Fišer V., Cetkovský V.: *Collected Papers of the R'99 World Congress, Recovery, Recycling, Re-integration* (Barrage A., Edelmann X., ed.), III, str. 509. Ženeva, 2.–5. únor 1999. EMPA, Ženeva 1999.
19. Vašut S., Briš P., Ponížil P., Hrabí L.: *Inter Noise 98 – The 1998 International Congress on Noise Control Engineering* (Marshall H., ed.), str. 180. Christchurch, 15.–18. listopad 1998. International Institute of Noise Control Engineering, Christchurch 1998.
20. Lapčík Jr. L., Briš P., Vašut S., Fišer V., Cetkovský V., Lapčík L.: *12. Internationales Symposium SWISSBONDING 98* (Schindel-Bidineli E. M., ed.), P06. Rapperswill am Zürichsee, 12.–14. květen 1998. Print Service Mühlheim, Rapperswill am Zürichsee 1998.
21. Lapčík Jr. L., Vašut S., Briš P., Fišer V.: *ICCE/5 Fifth International Conference on Composites Engineering* (Hui D., ed.), str. 515. Las Vegas, 5.–11. červenec 1998. International Community for Composites Engineering and College of Engineering, University of New Orleans, Las Vegas 1998.
22. Pulda J., Reissová A.: *Chem. Listy* 93, 445 (1999).
23. Pytela J.: *Chem. Listy* 93, 441 (1999).
24. Lapčík Jr. L., Cetkovský V., Vašut S., Briš P., Lapčíková B.: *J. Polym. Mater.*, v tisku.
25. Swift M. J., Briš P., Horoshenkov K. V.: *Appl. Acoustics* 57, 203 (1999).

E. Lapčík, Jr., V. Cetkovský, B. Lapčíková, and S. Vašut (*Institute of Physics and Material Engineering, Faculty of Technology, Technical University of Brno, Zlín*): **Materials for Noise and Vibration Attenuation**

This paper reviews construction principles and various materials used for production of noise and vibration dumping systems important in technical practice. Relations between material characteristics and end-use dumping properties are discussed. Basic physical parameters and their definitions are summarized. Suitable polyurethane/polybutadiene binder systems based on the liquid rubber KrasolTM are presented.