

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Zuzana Trojanová

Co jsou to HIDAMETS?

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 39 (1994), No. 6, 331--346

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139549>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1994

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

# Co jsou to HIDAMETS?

Zuzana Trojanová, Praha

V denním životě se setkáváme s vibracemi, ať již při jízdě dopravními prostředky nebo při manipulaci s různými stroji nebo nástroji. Nepříjemné důsledky vibrační konstrukcí nebo vibrací v průmyslu lze rozdělit do tří skupin:

- i) vibrace, vedoucí k únavě materiálů (např. součástí letadel);
- ii) vibrace jsou zdrojem hluku;
- iii) vibrace jsou nepříjemné samy o sobě, i když nejsou hlučné nebo nehrozí porušením konstrukce.

Metody, kterými lze čelit těmto vibracím lze rozdělit také do tří skupin:

- v) Konstrukce je masivní a pevná, a proto je amplituda kmitů minimální.
- vv) Konstrukce má takový tvar a rozměry, že se systém nedostává do rezonance.
- vvv) Vibrace jsou tlumeny.

První řešení je drahé a velká hmotnost konstrukce může působit i komplikace. Druhá možnost je jen částečně účinná, je-li vibrační spektrum široké. V třetím případě je použito nějakého tlumícího členu nebo lázně. Materiály používané k tomuto účelu jsou zpravidla viskoplastické organické látky. Jejich aplikace je v řadě případů problematická, protože nemají dobré mechanické vlastnosti, špatně snášejí vysoké teploty a hrozí i kontaminace životního prostředí (např. u olejů). Daleko výhodnější je použití kovového materiálu (zpravidla slitiny), který účinně a bezpečně dissipuje vibrační energii.

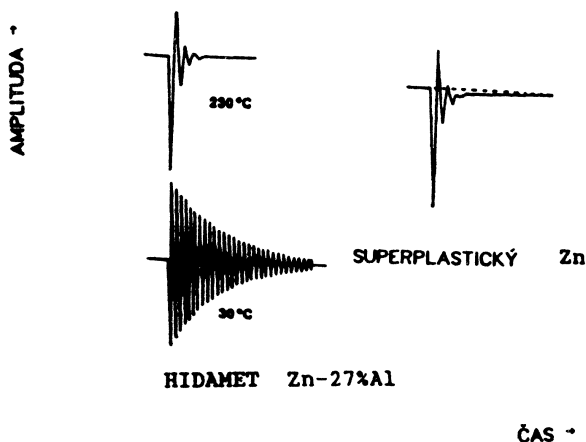
Příkladem takového materiálu je SONOSTON, slitina na bázi Mn a Cu, která se používá pro „tiché“ lodní šrouby. Má dobré mechanické i antikorozní vlastnosti a tlumí dobře vibrace a hluk, jež jinak vysílá šroub do moře. Jiným méně exotickým příkladem jsou odhlučněné motory osobních a nákladních automobilů a výtahů.

Čím více je známo o vlivu vibrací a hluku na lidský organizmus, tím přísnější jsou normy pro průmysl (vibrace a hluk v továrnách), tak i pro samotné výrobky.

Vnitřní tlumení (tření) může být definováno jako schopnost materiálu přeměňovat mechanickou energii vibrací na teplo. Vedle materiálů s velkou schopností vnitřního tlumení jsou pro praxi důležité i ty, které mechanické kmity tlumí jen velmi málo. Ty se hodí např. pro výrobu hudebních nástrojů. Materiály s velkým tlumením bývají označovány jako HIDAMETS (High DAMping METals) resp. HIDAMATS (High DAMping MATerials). Na obr. 1 jsou znázorněné tlumené kmity pro konstrukční ocel střední pevnosti, HIDAMET ZnAl a superplastický Zn [1]. Z obrázku je zřejmé, že akustická vlna je v HIDAMET utlumená velice rychle. Podle [2] bylo spočteno, že 1 cm<sup>3</sup> materiálu NIVCO-10 firmy Westinghouse absorbuje 50 W při frekvenci 60 Hz a

---

Doc. RNDr. ZUZANA TROJANOVÁ, CSc. (1942), je docentkou experimentální fyziky na katedře fyziky kovů MFF UK, Ke Karlovu 5, 121 16 Praha 2.



Obr. 1.  
Porovnání útlumu volných kmitů při nízké frekvenci ( $\sim 5$  Hz) pro ocel střední pevnosti, a dva HIDAMETS Zn a Zn-Al (podle [1]).

zatížení na mezi únavy. Z tohoto příkladu je vidět, že HIDAMETS mohou dissipovat značnou energii.

V tomto článku pojednáme o některých kovech a slitinách, hodících se pro eliminaci hluku a vibrací a mechanismech, které jsou příčinou dissipatione mechanické energie v těchto materiálech.

## Vnitřní tlumení

Ve hmotném prostředí jsou částice (atomy, ionty) mezi sebou vázány vazbou, kterou můžeme v prvním přiblížení považovat za elastickou. Kmity částice vyvolají v okolním prostředí pružná napětí, která postupně vyvolají kmity sousedních částic (energie kmitů částice se předá okolním částicím) a posléze dalších. Jev šíření kmitů se nazývá vlnou. Při průchodu vlny hmotným prostředím ubývá její energie. Rovinnou vlnu, šířící se ve směru  $z$  můžeme popsat vztahem

$$(1) \quad A = A_0 \exp(-\alpha_L z) \sin(\beta z - \omega t),$$

kde  $A$  je amplituda nějaké veličiny, jako je napětí, deformace, tlak, posunutí, rychlost nebo zrychlení.  $A_0$  je počáteční hodnota této veličiny. Vlna, frekvence  $f = \omega/2\pi$ , je

charakterizována úhlovým vlnočtem  $\beta = 2\pi f/v$  s fázovou rychlostí  $v$ . Zeslabení vlny je dáno konstantou útlumu  $\alpha_L$  na jednotku délky dráhy v prostředí. Útlum se také často měří v neperech na jednotku času a potom je  $\alpha_L = v\alpha_L$ .

Zeslabení vlny má v zásadě dvě hlavní příčiny:

- I rozptylový mechanismus,
- II relaxační mechanismus.

V případě nějakého rozptylového mechanismu se vlna tlumí na nehomogenitách. Takovou nehomogenitou může být ryba v oceánu nebo hemoglobin v krvi. V kovových materiálech je nehomogenitou např. krystalová anizotropie, zrno polykrystalického materiálu, precipitáty, inklúze, atp.

Průchod vlny v materiálu je spojen s elastickou deformací vyvolanou periodicky se měnícím napětím. Funguje-li nějaký relaxační mechanismus, dochází ke zpoždování deformace za napětím tedy k jevům anelasticity a deformační energie, nesená vlnou je dissipována nějakým vnitřním procesem. Ztrátový úhel  $\varphi$  je definován analogicky jako v nauce o elektrině jako úhel, o který se zpožďuje deformace za napětím. Kmity atomů nebo iontů, ke kterým dochází při průchodu vlny, jsou určitou analogií vlastních kmitů mřížky fononů. Z tohoto hlediska se můžeme dívat na anelastickou relaxaci jako na interakci akustických fononů s defekty mřížky, volnými elektrony, dislokacemi, tepelnými fonony, magnony, jadernými spiny atd.

Akustická měření mají určitou specifikou. Velikost dekrementu je vázána na použitou metodu, geometrii uspořádání resp. také i na použitý akustický spoj. Z tohoto hlediska nelze naměřené absolutní hodnoty dekrementu (útlumu) interpretovat samy o sobě (jako např. hodnoty elektrického odporu nebo hustoty). Fyzikální modely anelastického chování pevných látek jsou tvořeny pro frekvenční, teplotní a amplitudové závislosti dekrementu. Použijeme-li ovšem pro měření dekrementu rezonanční metodu, lze frekvenci, na kterou je soustava naladěna, měnit jen nepatrně změnou geometrie vzorku. V tom případě zbývá jen teplotní závislost. Naštěstí je možné, pokud se jedná o jednoduchý relaxační děj, spojený s atomovými přeskoky, použít Arrheniovu rovnici k převedení frekvenční závislosti na teplotní

$$(2) \quad \ln(f^{-1}/f_0^{-1}) = (\Delta H/k) \cdot (1/T),$$

kde  $f$  a  $f_0$  jsou frekvence, resp. frekvenční konstanta,  $\Delta H$  je aktivační entalpie procesu,  $k$  Boltzmannova konstanta a  $T$  absolutní teplota.

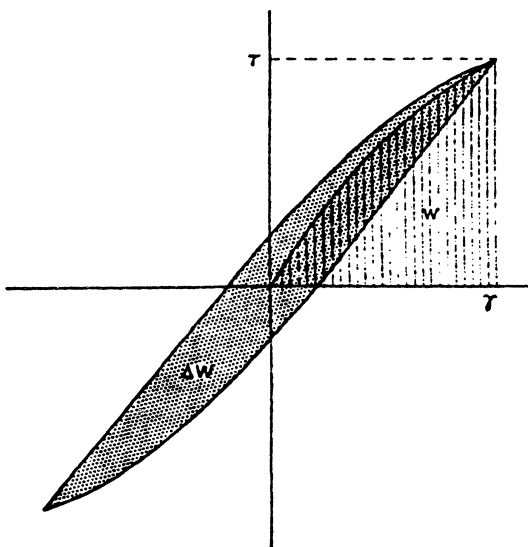
Podobně je obtížné měřit frekvenční závislost i s běžící vlnou. S jedním měničem lze změřit závislost obvykle v rámci jednoho řádu. Výměna měniče vnáší do měření již určitou chybu.

Měření za nízkých teplot je experimentálně nepoměrně jednodušší, než měření za teplot vysokých. To je dáno tím, že v případě vysokých teplot je nutné užít k přenosu vlnění vlnovodů.

## Měření vnitřního tlumení

Existuje řada metod, jak měřit vnitřní tlumení. V nejjednodušším případě je vzorek ve tvaru trámku upevněný a na volném konci působí síla, která jej přivede do stavu vynucených příčných kmitů. Jestliže je působení síly přerušeno, amplituda volných kmitů klesá s časem.

Logaritmický dekrement útlumu volných kmitů je definován jako  $\delta = \ln(A_n/A_{n+1})$ , máme-li posloupnost kmitů, je dekrement počítán jako střední hodnota dekrementů po sobě následujících amplitud  $\bar{\delta} = N^{-1} \ln(A_1/A_{n+1})$ , kde  $A_1$  je první amplituda a  $A_{n+1}$  je  $n + 1$  amplituda v posloupnosti volných kmitů. Je-li hladký exponenciální průběh obalové křivky rušen nějakými poruchami z vnějšího nebo vnitřního zdroje, nelze užít střední hodnoty. V tomto případě lze snímat klesající amplitudu rychlým AD převodníkem a převést časovou závislost pomocí Fourierovy transformace na frekvenční.  $\delta$  je pak vyhodnoceno z rezonanční křivky.



Obr. 2.  
Hysterezní smyčka v diagramu  
napětí  $\tau$  – deformace  $\gamma$ .

Jiná metoda je vztažena k pojmu specifické vnitřní tlumení  $P$

$$(3) \quad P = \Delta W/W,$$

kde  $\Delta W$  je energie dissipovaná v jednom cyklu a  $W$  maximální energie spojená s tímto cyklem. V tomto případě jsou měřeny ztráty v jednom cyklu, které jsou úměrné ploše hysterezní křivky (viz obrázek 2)

$$(4) \quad P = \Delta W/W = (A_n^2 - A_{n+1}^2)/A_n^2.$$

Je-li tlumení malé ( $\delta \ll 1$ ), souvisí ztrátový faktor  $\eta$  a ztrátový úhel  $\varphi$  s  $P$  vztahem

$$(5) \quad \eta = \operatorname{tg} \varphi = \delta/\pi = P/2\pi.$$

V rezonančních metodách se měří rezonanční křivka v závislosti na frekvenci. Součinitel jakosti (opět definovaný analogicky jako v nauce o elektřině) je pak

$$(6) \quad Q^{-1} = \sqrt{3} f_r/\Delta f,$$

kde  $f_r$  je rezonanční frekvence a  $\Delta f$  pološířka rezonanční křivky a

$$(7) \quad Q^{-1} = \delta/\pi = \operatorname{tg} \varphi.$$

Další skupina zahrnuje metody, ve kterých se měří přímo ztrátový úhel  $\varphi$  mezi napětím (vynucující silou) a deformační odezvou. To je možné jen u nižších frekvencí ( $f \ll 1$  Hz), když pro ztrátový úhel platí  $\operatorname{tg} \varphi \ll 1$ .

V případě HIDAMETS je  $Q^{-1} \geq 10^{-2}$  a rovnice (7) musí být modifikována, je-li měřeno  $\delta$

$$(8) \quad Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} \left( 1 - \frac{\delta}{2\pi} + \dots \right),$$

chyba v určení  $Q^{-1}$  použitím rovnice (6) je pro  $Q^{-1} = 10^{-2}$  0,5 % a pro  $Q^{-1} = 10^{-1}$  už 5 %.

V experimentech s běžící vlnou měříme rychlost  $v$  a koeficient útlumu  $\alpha$ . Platí

$$(9) \quad \operatorname{tg} \varphi = Q^{-1} = \delta/\pi = 2v\alpha_L/\omega.$$

V praxi pak měříme některou z uvedených veličin, podle toho, jakou metodu k měření použijeme, a souvislost s ostatními veličinami je pak dána jednoduchými vztahy (4)–(9).

## Experimentální zařízení pro měření vnitřního tlumení

Existuje mnoho různých zařízení pro měření vnitřního tlumení, určených pro jednotlivá frekvenční pásma.

- (1) Kyvadlo pro torzní nebo příčné kmity v subrezonančním režimu, ve kterém se měří tlumení (dekrement) volných kmitů. Kyvadlo může také pracovat v rezonančním režimu, kde se měří rezonanční křivka a rezonanční frekvence. Při optickém záznamu lze měřit asi do 50 Hz, charakteristické jsou frekvence  $\sim 1$  Hz.
- (2) Technika rezonančních tyčí. Zařízení pracují v rezonančním režimu, přenos kmitů je realizován mechanickou, elektrickou nebo elektromagnetickou vazbou. Buzené kmity jsou v podélném i příčném módu a zařízení jsou schopna pracovat od 0,1 do 40 kHz.
- (3) Složený oscilátor pro podélné i příčné módy pracuje v oboru 30–200 kHz.

## Mechanismy vnitřního tlumení

Jak již bylo řečeno, v průběhu anelastických relaxací dochází ke zpoždování deformace za napětím. Toto zpoždování je způsobeno pohybem defektů v mřížce za působení napětí, neseného zvukovou vlnou. V HIDAMETS mohou být tyto napětím indukované mechanismy spojené s dislokacemi, rozhraními (hranice zrn, dvojčat, doménové stěny, hranice mezi různými fázemi), mohou to být termoelastické ztráty resp. magnetoelastické jevy. Na fenomenologické úrovni mohou být tyto mechanismy rozděleny do tří kategorií:

### (A) Dynamická hystereze

Je vyvolávána napětím podmíněným přeuspořádáním defektů, překonávajících lokální bariéry tepelnou aktivací. Uspořádávací proces vede k produkci anelastické deformace a mechanismus se také nazývá lineární reverzibilní anelastická relaxace. Tlumení způsobené dynamickou hysterezí je frekvenčně závislé a amplitudově nezávislé.

### (B) Statická hystereze

Tento mechanismus je nezávislý na frekvenci a je amplitudově závislý. Důležitým případem je mechanické odtrhávání dislokací od kotvicích příměsí.

### (C) Kombinace obou mechanismů.

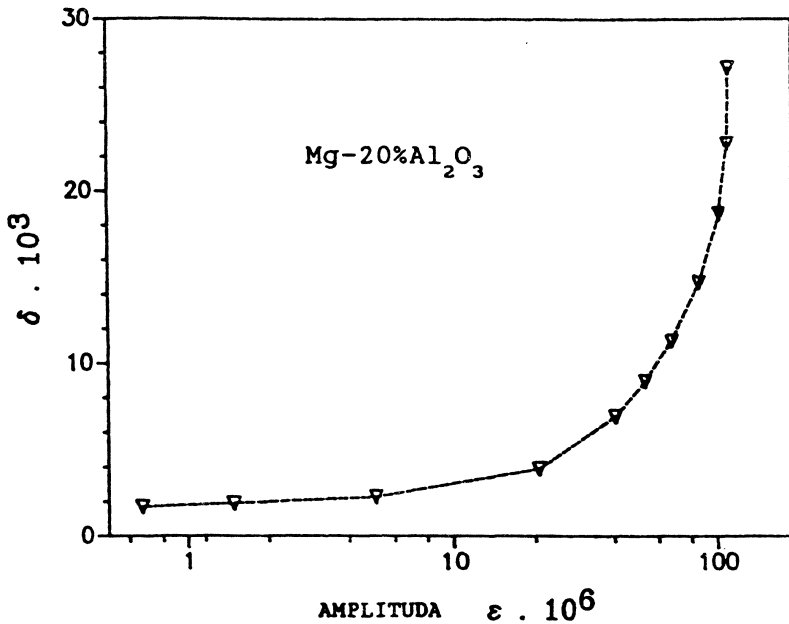
Materiály, které vykazují velké vnitřní tlumení lze dělit podle složení (struktury), resp. podle mechanismů, které jsou příčinou velkého tlumení.

## Dislokační tlumení

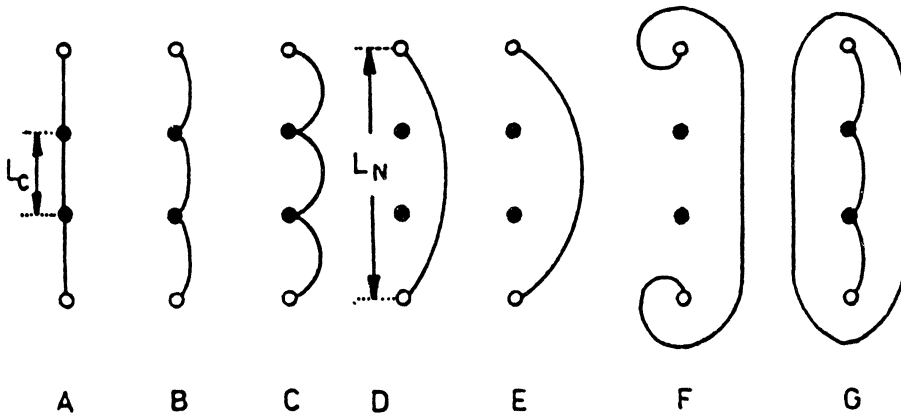
je příkladem, kde se kombinuje dynamická i statická hystereze. Na obrázku 3 je uvedena amplitudová závislost dekrementu  $\delta$  pro tepelně zpracovaný kompozit, kde do matrice z technicky čistého hořčíku jsou vnořeny částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Charakter této závislosti je typický nejen pro HIDAMETS. Závislost, kdy pro malé hodnoty amplitudy deformace (či napětí — v elastickém oboru jsou svázány Hookeovým zákonem) je dekrement nezávislý (resp. málo závislý) na amplitudě a pro větší hodnoty amplitudy závisí na deformaci, bývá naměřena u většiny materiálů obsahujících dislokace. U HIDAMETS jsou pak hodnoty dekrementu vysoké. Schematicky je možné v amplitudové závislosti rozdělit dekrement na dvě složky:

- amplitudově nezávislá (málo závislá) složka dekrementu  $\delta_I$ ;
- amplitudově závislá složka  $\delta_{II}$ , někdy také označovaná jako  $\delta_H$ , kde index H vyjadřuje, že jde o hysterezní ztráty.

Dislokační vnitřní tlumení lze fyzikálně interpretovat na základě modelu Granata a Lückeho [3]. Předpokládejme, že segment dislokační linie délky  $L_N$  mezi dvěma pevnými kotvicími body, od nichž se neodtrhne ani při velkém působícím napětí. Takovými body mohou být uzly dislokační sítě v krystalu či kotvicí body Frankova-Readova zdroje. Mezi těmito uzly je dislokace obsazena slabšími kotvicími body (příměsí), jejichž



Obr. 3. Amplitudová závislost dekrementu pro kompozit Mg-20%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

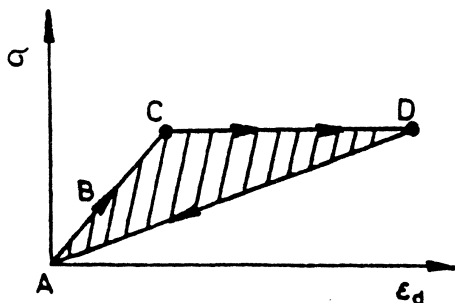


Obr. 4. Model Granata a Lückeho.

vzdálenost podél dislokační linie je  $L_C$ . Působí-li napětí (periodicky se měnící napětí při průchodu zvukové vlny), začne se dislokace pod účinkem tohoto napětí prodlužovat (je elastická, můžeme si ji představit jako strunu) — viz obrázek 4. Ohýbání dislokační linie mezi slabšími kotvicími body pokračuje tak dlouho, až se po dosažení kritické křivosti dislokace od příměsových atomů odtrhne (pozice C na obrázku 4). Skluzovou rovinou dále operuje delší segment dislokace (viz D na obrázku 4). Je-li v okamžiku na obrázku označeném jako E dosaženo maxima napětí, dislokační segment se začne postupně pružně stahovat — působící síla se zmenšuje — až dojde k jeho opětovnému zachycení příměsovými atomy. V následujícím půlcyklu má napětí opačnou polaritu



a dislokace se vyklenuje na druhou stranu. Pokud však působící napětí přesáhne kritickou hodnotu, potom v poloze E dojde k tomu, že segment dislokační linie již samostatně operuje ve skluzové rovině a funguje jako Frankův-Readův zdroj.



Obr. 5.  
Hysterezní smyčka pro dislokaci, která se pružně stahuje do výchozí polohy.

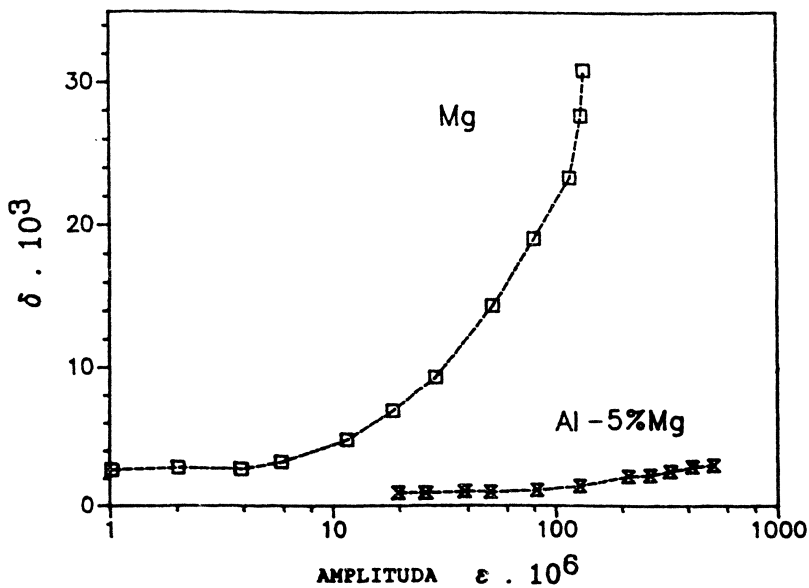
Na obrázku 5 je ukázána závislost deformace, realizované pohybem dislokací, na napětí. Má charakter hysterezní smyčky. Označené body A–D odpovídají situacím v obrázku 4. Dynamické ztráty (na obrázku 5 až do bodu C odpovídají složce dekrementu  $\delta_I$ , dojde-li k odtržení dislokace od příměsí, jde o ztráty hysterezní,  $\delta_{II} = \delta_H$  je úměrný ploše hysterezní smyčky. Granato a Lücke předpokládají, že dislokační segment délky  $L_N$  se pod účinkem časově proměnného napětí chová jako kmitající struna. Pohybová rovnice dislokace pro posunutí  $u(y, t)$  je podobná jako v mechanickém systému v rezonanci, totiž

$$(9) \quad m_i \ddot{u} + B\dot{u} - E_L(\partial^2 u / \partial y^2) = \sigma b = \sigma_0 b e^{i\omega t}$$

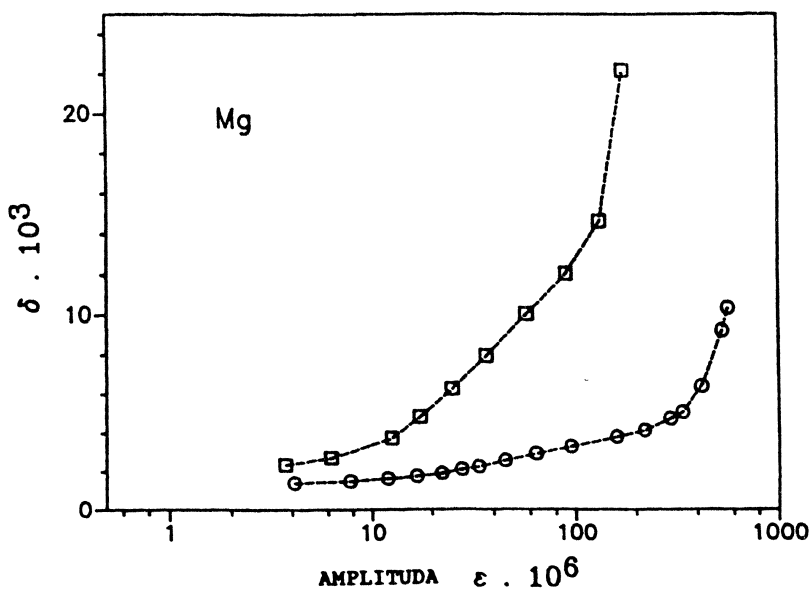
s okrajovými podmínkami  $u(0, t) = u(L_C, t)$ ; tj. dislokace je přišpendlena příměsí ve vzdálenosti  $L_C$  a rovnice (9) popisuje její chování pro amplitudy menší než je kritická amplituda, při které již dojde k odtržení od příměsí. Druhý člen v rovnici (9) vyjadřuje, že síla odporu mřížky pro pohyb dislokace je úměrná rychlosti dislokace ( $B$  je konstanta dislokačního tření) a třetí člen zachycuje okolnost, že se dislokační linie brání proti prodlužování, tj. dislokace bez vnějšího napětí zaujímá polohu s nejkratší délkou.  $m_i \simeq \rho b^2$  ( $\rho$  je hustota materiálu,  $b$  délka Burgersova vektoru dislokace) a  $E_L$  je tah v dislokační čáře, pro který se zpravidla užívá zjednodušený výraz  $E \simeq Gb^2/2$ , kde  $G$  je modul ve smyku.

Řešení rovnice (9) není jednoduché. Uvedeme si jako příklad jedno přiblížení, často používané pro limitu malých frekvencí (do frekvence desítek až stovek kHz), kdy je kruhová frekvence  $\omega \ll \omega_0$ ,  $\omega_0$  je charakteristická frekvence, jejíž hodnota leží pro většinu materiálů v MHz oboru frekvencí. Pro koeficient útlumu dostaneme:

$$(10) \quad \delta_I \simeq \frac{ABL_C^4 \omega}{36Gb},$$



Obr. 6a. Srovnání velikosti vnitřního tlumení pro hořčík a slitinu Al-5%Mg.



Obr. 6b. Srovnání amplitudové závislosti vnitřního tlumení pro vzorky Mg připravené litím a práškovou metalurgií. Vzorek připravený práškovou metalurgií má menší hodnoty tlumení.

kde  $\Lambda$  je hustota dislokací. Je zřejmé, že tato složka tlumení je frekvenčně závislá a úměrná čtvrté mocnině délky malých dislokačních úseků, které můžeme v prvním přiblížení ztotožnit se vzdáleností příměsových atomů. Z výrazu (10) vyplývá velká citlivost vnitřního tlumení na koncentraci příměsových atomů. V případě amplitudově závislého vnitřního tlumení dojde na počátku k odtržení dislokace od příměsových atomů. Můžeme psát rovnici rovnováhy:

$$(11) \quad F = \sigma b(L_{C1} + L_{C2})/2.$$

Vazební síla  $F$  mezi dislokací a příměsovým atomem je rovna maximální síle, působící na dva sousední úseky dislokace délky  $L_{C1}$  a  $L_{C2}$ . Za předpokladu určité rozdělovací funkce pro délky dislokačních úseků, je možné psát pro hysterezní ztráty

$$(12) \quad \delta_H = (C_1/\varepsilon_0) \exp(-C_2/\varepsilon_0),$$

kde  $\varepsilon_0$  je amplituda deformace a konstanty  $C_1$  a  $C_2$  mají hodnoty

$$(13) \quad C_2 = K a \eta' L_{C0}$$

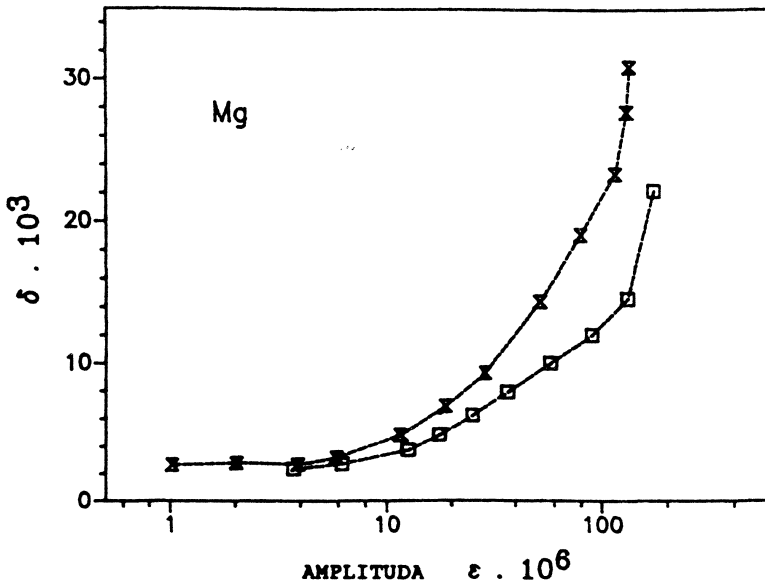
a

$$(14) \quad C_1 = (\Omega \delta_0 / \pi^2) (\Lambda L_N^3 / L_{C0}) C_2.$$

$L_{C0}$  je střední hodnota délek kratších dislokačních úseků,  $K$  je faktor, závislejší na anizotropii elastických konstant a orientaci vzorku vzhledem k působícímu napětí,  $a$  je mřížková konstanta,  $\eta'$  velikostní faktor  $\eta' = (1/a)(da/dc)$  ( $c$  je koncentrace příměsových atomů),  $\delta_0 = 4(1 - \nu)\pi^2$  a  $\nu$  je Poissonova konstanta. Orientační faktor  $\Omega$  zahrnuje příspěvek dislokací z různých skluzových systémů.

Z rovnice (12) plyne, že  $\ln(\delta_H \varepsilon_0)$  by měl lineárně záviset na reciproké hodnotě  $\varepsilon_0^{-1}$ . Směrnice této závislosti Granata a Lückeho  $\ln(\delta_H \varepsilon_0)$  versus  $\varepsilon_0^{-1}$  je závislá na  $1/L_{C0}$ . Úsek na ose  $y$  pro  $\varepsilon_0^{-1} = 0$  je závislý na kombinaci  $\Lambda L_N^3 / L_{C0}^2$ , a proto je možné úseky  $L_N$ ,  $L_{C0}$ , resp. hustotu dislokací  $\Lambda$  při znalosti jedné z veličin určit.

Typickým příkladem HIDAMET, kdy velké tlumení je z největší části podmíněno dislokačním tlumením je Mg a slitiny Mg obzvláště v lité formě. Tvářené materiály mají již tlumení menší, ale stále ještě vysoké. Na obrázku 6a je uvedeno srovnání velikosti vnitřního tlumení pro hořčík technické čistoty a slitinu Al-5% Mg. Je ovšem ohromný rozdíl ve velikosti tlumení. Na obrázku 6b jsou uvedeny amplitudové závislosti dekrementu pro technické Mg v lité formě a tentýž materiál, připravený práškovou metalurgií. Litý materiál má tlumení výrazně vyšší. Dalším typickým zástupcem dislokačního tlumení v HIDAMETS je šedá litina. Předpokládá se, že k dislokačnímu tlumení dochází hlavně ve vyloučených částech grafitu [4-6]. Příčinou velkého tlumení je snadný pohyb dislokací v grafitu. Ukázalo se, že vyloučený grafit ve tvaru lupínek působí efektivněji na vnitřní tlumení než částice sférického tvaru [7]. Šedá litina s vyloučeným grafitem může sloužit také jako příklad kompozitního materiálu a mohou tedy být aplikovány představy, kdy velikost tlumení je dána poměrem  $E_G/E_M$



Obr. 7. Efekt stárnutí při pokojové teplotě. Horní křivka byla změřena po třech měsících stárnutí na pokojové teplotě.

(kde  $E_G$  a  $E_M$  jsou Youngovy moduly grafitu a matrice). Malá hodnota poměru  $E_G/E_M$  je příčinou velkého tlumení [6]. Naopak kompozity zpevněné pevnými vlákny jako HIDAMETS v mnohých případech zklamaly očekávání. Využití dislokačního tlumení v praxi působí určité potíže, protože dochází k přerozdělování příměsí v jádře dislokace a tím se vlastnosti materiálu mění v čase. Příklad je na obrázku 7, kde jsou uvedeny dvě křivky vnitřního tlumení, které byly získány v rozpětí tří měsíců, kdy materiál stárnul na pokojové teplotě.

### Relaxace hranic zrn

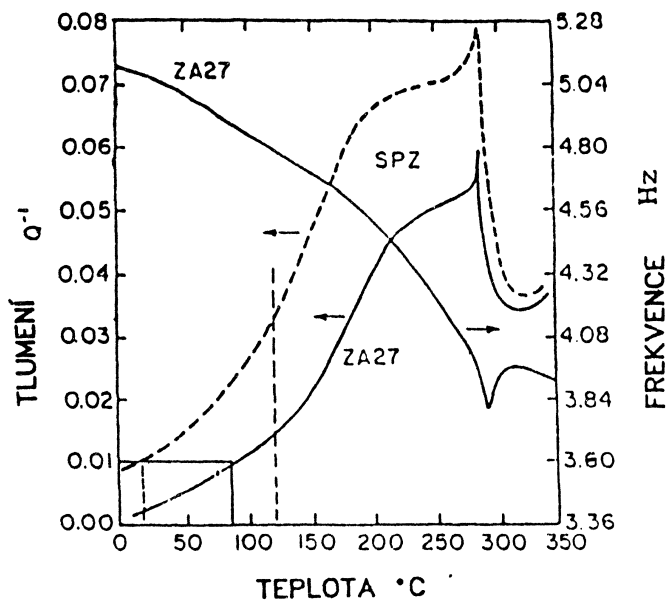
se pozoruje na polykrystalických vzorcích (u monokrystalů chybí), které mají velké množství různorodých hranic. Pod účinkem napětí se zrna po sobě posouvají. Vzniklé napětí je akomodováno dodatečnou anelastickou deformací v hranici zrna. Reciproká hodnota součinitele jakosti má tvar debyeovského maxima

$$(15) \quad Q_{GB}^{-1} = \Delta_{GB} \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2},$$

kde  $\Delta_{GB}$  je maximální relaxace pro  $\omega\tau = 1$ . Relaxační doba  $\tau$  je v tomto případě určena velikostí zrna  $d$  a efektivní viskozitou hranice  $\chi$  podle vztahu

$$(16) \quad \tau = \chi d / \Delta b G_U,$$

kde  $\Delta b$  je šířka hranice a  $G_U$  okamžitá hodnota modulu ve smyku. Jsou-li hranice zrn zpevněny precipitáty, relaxace zcela vymizí nebo je podstatně redukována. Zvláštní význam mají pak dvojčatové hranice a materiály, které jsou superplastické. U těchto materiálů dochází k makroskopickému pohybu hranic zrn a mechanická energie, nesená zvukovou vlnou je spotřebovaná na tento pokluz po hranicích zrn. Příkladem tlumení v hranicích zrn mohou být výsledky zjištěné na slitinách Zn-Al [8]. Teplotní závislost součinitele jakosti je uvedena na obrázku 8 pro slitinu ZA27 (Zn-27% Al) a eutektoidní superplastickou slitinu SPZ. Zároveň je uvedena frekvenční závislost součinitele jakosti pro slitinu ZA27. Z obrázku je zřejmé, že dochází k prudkému zvýšení vnitřního tlumení pro teploty vyšší než 120° C. Tlumení je amplitudově nezávislé, a to při malých i velkých frekvencích. To naznačuje, že velká část útlumu pochází od dynamického relaxačního mechanismu. Maximum, odpovídající pohybu hranic zrn je v blízkosti 275° C a je výraznější pro vzorek, který vykazuje superplasticitu. Analýza experimentálních výsledků ukázala, že relaxacemi v hranicích zrn může být vysvětlena jen část extrémně velké hodnoty tlumení pro slitinu Zn-Al. Křivky tlumení se pro vyšší frekvence posunují k vyšším teplotám, tedy je přítomna složka tlumení spojená s tepelně aktivovatelnou relaxací. Tlumení bylo také závislé na tloušťce vzorku. Tyto okolnosti naznačují, že jsou přítomny termoelastické jevy.



Obr. 8. Součinitel jakosti  $Q^{-1}$  a rezonanční frekvence jako funkce teploty pro slitinu Zn-27% Al a eutektoidní superplastickou slitinu Zn-Al.

### Termoelastické tlumení

$Q_{TE}^{-1}$  vzniká při lineárním vratném relaxačním procesu, charakterizovaném jednoduchým relaxačním časem  $\tau$ . Ve vzorku, kterým prochází zvuková vlna, vznikají

oblasti, které jsou stlačené a ohřívají se a dilatované oblasti, které se ochlazují. Jsou-li frekvence a tloušťka vzorku takové, že čas potřebný k toku tepla napříč vzorkem je srovnatelný s periodou kmitů, je tlumení

$$(17) \quad Q_{TE}^{-1} = \Delta_{TE} \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2},$$

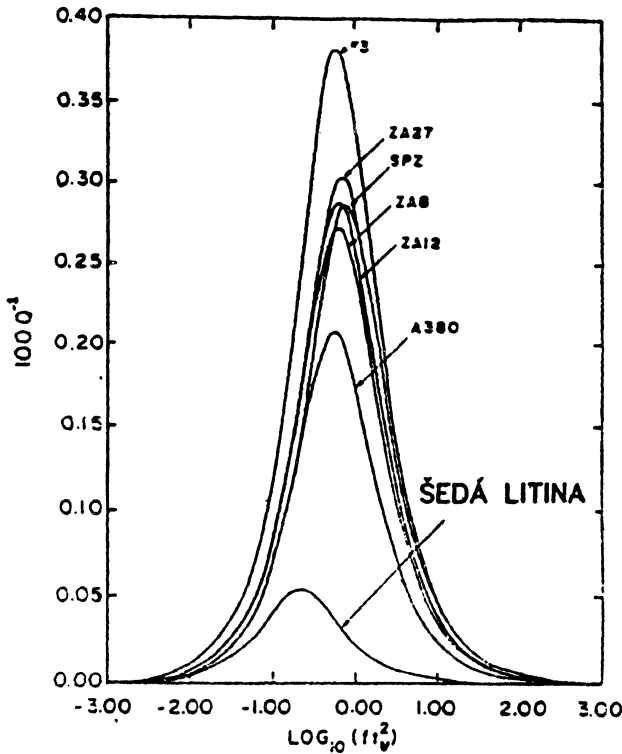
kde  $\Delta_{TE}$  je maximální relaxace pro  $\omega\tau = 1$ . Relaxační doba souvisí s tloušťkou vzorku  $t_V$  a teplotní vodivostí  $D_T$ ,

$$(18) \quad \tau = t_V^2 / \pi^2 D_T,$$

kde  $D_T = \sigma_T / c_V \rho$  ( $\sigma_T$  je koeficient tepelné vodivosti,  $c_V$  měrná tepelná kapacita při stálém objemu a  $\rho$  hustota). Maximální velikost relaxace je dána jako

$$(19) \quad \Delta_{TE} = E\alpha^2 T / c_V,$$

kde  $E$  je Youngův modul vzorku,  $\alpha$  koeficient teplotní roztažnosti a  $T$  absolutní teplota. Vhodnou metodou, jak srovnávat termoelastické tlumení, je měřítko  $Q^{-1}$  vs  $\log(ft_V^2)$ , kde  $f$  je měřicí frekvence. Takové „mistrovské křivky“ (master curve) pro slitiny Zn-Al a Sedaou litinu jsou uvedeny na obrázku 9.



Obr. 9. Termoelastické ztráty. Součinitel jakosti  $Q^{-1}$  jako funkce  $\log(ft_V^2)$ , kde  $f$  je frekvence v Hz a  $t_V$  tloušťka vzorku v cm. Slitiny označené jako #3, ZA8, ZA12 jsou slitiny Zn-Al-Cu, A380 je slitina Al-Zn-Cu, SPZ superplastická eutektoidní slitina Zn-27Al. Přesné koncentrace slitin viz [2].

## Tepelné toky mezi krystality

Působením napětí v nehomogenním polykrystalickém agregátu dochází k tomu, že se teplota vzorku mění od zrna k zrnu. Důsledkem jsou tepelné toky mezi krystality, které také mohou být příčinou termoelastických ztrát.

## Magnetoelastická relaxace

Základním prvkem magnetické struktury feromagnetických materiálů jsou oblasti spontánní magnetizace — domény. Tyto oblasti jsou od sebe odděleny doménovými stěnami, tj. oblastmi, ve kterých se postupně mění směr spinu na mnohých atomových rovinách. Charakteristiky těchto doménových stěn (tloušťka pohyblivost, energie) hrají roli v procesech spojených s dissipací mechanické energie. Přiložené napětí má vliv na strukturu domén. Domény s nízkou energií budou růst na úkor oblastí s energií vysokou, resp. objeví se nové struktury, které vzniknou uvnitř nebo na hranici zrn krystalu. Analogické změny v magnetické konfiguraci budou vznikat, jestliže napětí bude působit periodicky, jako je tomu v experimentech s vnitřním tlumením. Ve feromagnetických materiálech závisí velikost Youngova modulu (resp. modulu ve smyku) na stupni magnetizace. Defekt modulu  $\Delta E = E - E_0$  je vždy kladný a jeho maximální hodnota  $\Delta E_m = E_s - E_0$  je rozdíl mezi modulem v nasyceném stavu  $E_s$  a v demagnetovaném stavu  $E_0$ . Když je energie anizotropie velká ve srovnání s energií vnitřního napětí (tak je tomu například v případě Fe), vyvolá již přiložení nevelkého napětí pohyb doménových stěn (zejména 90stupňových). Pro  $\Delta E$  plyne

$$(20) \quad \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{3}{5} \chi_0 \lambda_{100}^2 \frac{E_s}{I_s^2},$$

kde  $\chi_0$  je počáteční magnetická susceptibilita,  $\lambda_{100}$  konstanta magnetostrikce ve směru  $\langle 100 \rangle$  a  $I_s$  hodnota nasycení magnetizace.

Magnetomechanické tlumení zahrnuje mnoho efektů a je obecně důsledkem interakce akustických fononů s vektorem magnetizace; je tedy spojeno se změnou magnetizace, vyvolanou periodickou změnou napětí při průchodu akustické vlny. Tato změna může být realizována řadou elementárních procesů, jako je irreverzibilní a reverzibilní pohyb doménových stěn, resp. rotace stěn. Jestliže přiložíme sílicí napětové pole, budou stěny domén mizet a zmizí také tlumení, spojené s těmito procesy. Magnetomechanické tlumení lze rozdělit do tří tříd:

- i) hysterézní ztráty, spojené s irreverzibilním pohybem stěn;
- ii) mikrovířivé toky, spojené s reverzibilními pohyby stěn;
- iii) makrovířivé toky, spojené se změnou magnetické indukce. V megahertzových oblastech se mohou vyskytnout ještě další efekty, které klasická teorie vířivých toků nevyšetřuje.

V této souvislosti je zajímavé si povšimnout analogie, která existuje mezi efektem působení napětí na doménové stěny a na dislokace. V obou případech vznikají ane-

lastické efekty z lineárně tlumeného pohybu, zatímco nelineární hysteretní jevy jsou spojeny s náhlým průnikem dopředu.

Příkladem HIDAMET, ve kterém dochází k magnetomechanickému tlumení, je SILENTALLOY. V amplitudové závislosti součinitele jakosti se pozoruje maximum [9] pouze při teplotách pod Curieovou teplotou. Magnetomechanické efekty podmiňují také tlumení v komerční slitině VACROSIL 010 (Fe-Cr-Al) [10]. Jiným příkladem může být SONOSTON. U této slitiny bylo pozorováno velké množství hranic dvojčat a soudilo se, že tlumení je způsobováno pohybem hranic těchto dvojčat [11]. Novější měření [2] ukázala, že velké tlumení vymizí, když materiál změní u Néelova bodu fázi z antiferomagnetické na paramagnetickou. To vedlo k hypotéze, že antiferomagnetická povaha dvojčatových hranic hraje důležitou roli v tlumícím mechanismu. Struktura dvojčatových domén vzniká u SONOSTONU při martenzitické transformaci.

### Transformační mechanismy

Vysoké hodnoty vnitřního tlumení se často zjišťují v oblastech teplot, kde se vyskytuje nějaká transformace, např. martenzitická transformace, nebo tam, kde se rozpouštějí precipitáty. Takové tlumení je často amplitudově nezávislé a úměrné  $|\dot{T}|/f$ , kde  $|\dot{T}|$  je rychlost ohřevu či ochlazování a  $f$  frekvence. Tlumení je také úměrné objemu materiálu, transformovaného v periodě kmitů. Jako příklad může sloužit termoelastický martenzit PROTEUS (Cu-Zn-Al), kde tlumení roste se statickým zatížením a transformace vede k závislosti na  $|\dot{T}|/f$ .

### Kombinace mechanismů

Jak již bylo v předchozím při uvádění jednotlivých mechanismů řečeno, v praxi dochází k tomu, že se v HIDAMETS může kombinovat i několik mechanismů vnitřního tlumení. Je to případ SONOSTONU, kde je velké tlumení způsobeno pohybem hranic zrn a magnetomechanickými efekty. Jiným příkladem jsou slitiny Zn-Al, kde hlavními mechanismy, vedoucími k velkému tlumení jsou pohyb po hranicích zrn a termoelastické ztráty. Naměřené rozšíření maxim v teplotním relaxačním spektru naznačují, že k těmto mechanismům přistupují ještě ztráty, způsobené dislokačním třením [8].

### Použití HIDAMETS

Životnost lopatek turbín, které podléhají únavě, byla prodloužena použitím slitiny oceli obsahující 12 % Cr (NIVCO-10 Westinghouse), která byla speciálně vyvinuta pro tento účel [12]. Je také výhodné používat šedé litiny pro výrobu základních rámu strojů, nebo bloků motorů, protože litina je velmi efektivní HIDAMET a její vlastnost tlumit vibrace se zlepšuje se zvyšující se amplitudou. Nevýhodou je však náchylnost litiny ke křehkému lomu. Jak již bylo řečeno, má tlumení zvuku význam nejen ekologický, ale i strategický. To je případ tichých ponorek s lodním šroubem ze slitiny



SONOSTON. Pro odhlučnění kabin letadel byla vyvinuta relativně nedávno slitina Cu–Zn–Al, zvaná PROTEUS, která má i tu výhodu, že její tlumení roste se statickým zatížením [13]. HIDAMETS mohou být s úspěchem použity k odhlučnění alternátorů, klimatizačních jednotek nebo čerpadel, tam kde se klasicky používají např. olejové lázně a hrozí nebezpečí kontaminace životního prostředí. Jako HIDAMET lze použít i slitiny NITINOL (slitiny Ti a Ni), které kromě velkého tlumení vykazují i tvarovou paměť. Použití materiálů s velkým tlumením je vhodné u ručních nástrojů jako jsou řetězové pily, pneumatické vrtačky nebo kladiva. Tyto nástroje škodí jednak sluchu a také přenášejí vibrace na ruce dělníků, což vede k nemocím z povolání. Použitím tlumících členů ze slitiny Mn–Cu byl redukován hluk pneumatické vrtačky do betonu asi o 8 dB a vibrace o frekvenci 8 kHz byly zcela odstraněny [14]. Ke snížení hlučnosti a prodloužení životnosti by leckdy přispělo i nahrazení běžných bronzů slitinami Zn–Al. HIDAMETS mají své místo i v architektuře, kde mohou přerušit akustické mosty, vedoucí z hlučných provozů. V oblastech, kde hrozí zemětřesení mohou v sendvičových strukturách přispět k bezpečnosti konstrukcí [15].

## Závěr

Historicky využívali měření vnitřního tlumení především fyzikové, kteří volili tuto metodu ke studiu jevů ve fyzice pevných látek. Předložený článek si nečiní nárok na to, že by vyčerpávajícím způsobem zpracoval téma materiálů s vysokým vnitřním tlumením. Autorka chtěla spíše poukázat na jevy způsobující velké tlumení a možnosti jejich využití.

Část výsledků byla získána v rámci práce na projektu GA ČR/93/0381.

## Literatura

- [1] I. G. RITCHIE, Z. L. PAN: *Metall. Trans.* 22A (1991), 607.
- [2] I. G. RITCHIE, Z. L. PAN, K. W. SPRUNGSMANN, K. H. SCHMIDT, R. DUTTON: *Canad. Met. Q.* 26 (1987), 239.
- [3] A. S. NOWICK, B. S. BERRY: *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids*. Academic Press, New York and London 1972.
- [4] M. A. O. FOX, R. D. ADAMS: *Mech. Eng. Sci.* 15, (1973), 81.
- [5] R. D. ADAMS, M. A. O. FOX: *J. Iron Steel Inst. London* 221 (1973), 37.
- [6] P. MILLET, R. SCHALLER, W. BENOIT: *J. Phys.* C9 (1983), 511.
- [7] R. SCHALLER, W. BENOIT: *Material Technik* 1 (1985), 63.
- [8] I. G. RITCHIE, Z. L. PAN, F. E. GOODWIN: *Metall. Trans.* 22A (1991), 617.
- [9] K. AMANO, M. SAHASHI, H. TOKORO, M. NAGAKAWA: *Inter. Fric. Ultrason. Attenuation Solids*. Proc. 6th Int. Conf. (Eds. R. R. HASIGUTI, N. MIKOSHIBA), University Tokyo Press, Tokyo, 1977, 763.
- [10] W. SCHNEIDER, P. SCHREY, G. HAUSCH, E. TÖRÖK: *J. de Physique* C5 (1981), 635.
- [11] R. DE BATIST: *J. Phys.* C9 (1983), 39.
- [12] A. COCHARD: *Trans. Am. Soc. Metals* 52 (1960), 914.
- [13] U. VANDEURZEN, H. VERELST, R. SNOEYES, L. DELAEY: *J. Phys.* 42 (C5) (1981), 1169.
- [14] E. J. RICHARDS: *Chart. Mech. Engr.* 13 (1966), 266.
- [15] W. H. ROBINSON: *J. Phys.* 46 (C10) (1985), 421.