



Akustické metody ve fyzice, technice a medicíně

- a. Základní pojmy fyzikální akustiky
- b. Akustická mikroskopie
- c. Akustická defektoskopie a sonografie
- d. Vnitřní tlumení
- e. Akustická emise

Doc. RNDr. František Chmelík, CSc.

**Katedra fyziky materiálů,
Universita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta
Ke Karlovu 5, 121 16 Praha 2,
Česká republika**

Základní pojmy fyzikální akustiky

Zvuk je vlna šířící se hmotným prostředím:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad \text{ve třech rozměrech:} \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = v^2 \Delta \xi$$

ξ	posunutí elementu materiálu při průchodu vlny
x, t	souřadnice a čas
v	rychlost zvuku

Tato rovnice vyjadřuje vztah mezi kmitáním elementu hmotného prostředí a šířením tohoto rozruchu na další elementy prostřednictvím vazeb mezi nimi.

Materiál je charakterizován E (Youngův modul)
 ρ (hustota)
 c_{ij} (elastické konstanty)

Nejjednodušší případ: $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ Měřením rychlosti zvuku lze
určovat elastické konstanty

Poznámka: Obecně je problém mnohem složitější

$$v_1 = \sqrt{(c_{11} + c_{12} + 2c_{44})/2\rho}$$

$$v_2 = \sqrt{c_{44}/\rho}$$

$$v_3 = \sqrt{(c_{11} - c_{12})/2\rho}$$

$v_1 \dots$ rychlost podélných vln

$v_2, v_3 \dots$ rychlosti příčných vln

Akustická mikroskopie

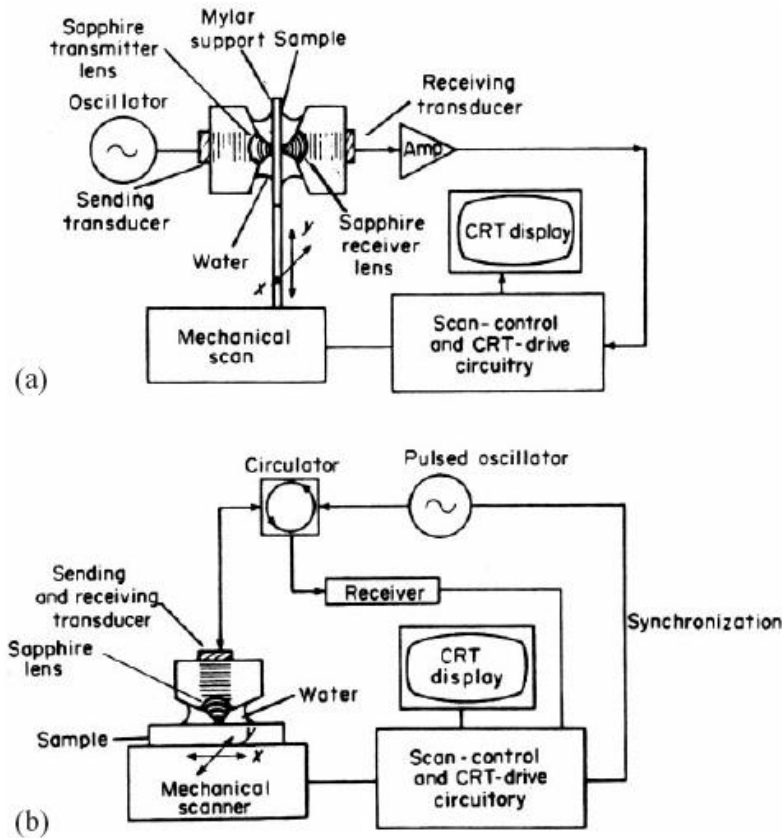
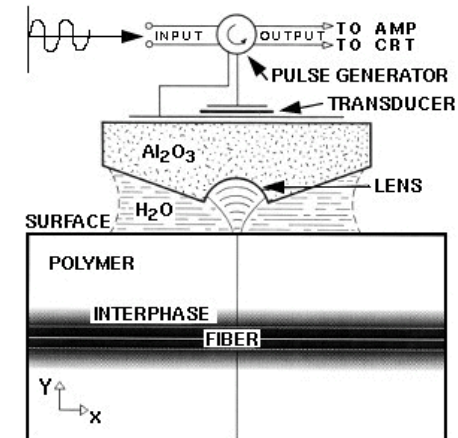
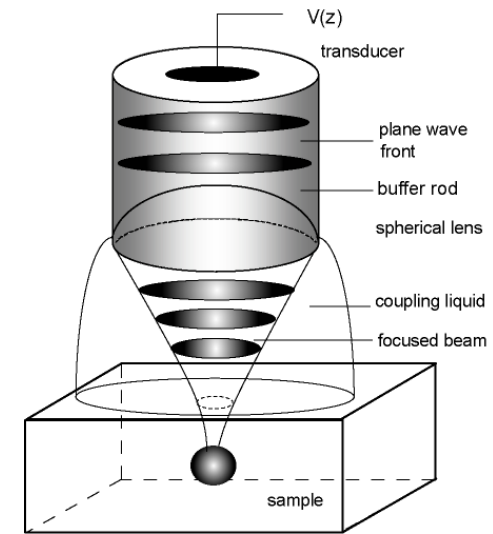


Figure 1
Scanning acoustic microscopes: (a) pulse transmission and (b) pulse-echo modes (courtesy of C. Quate and L. Lam, Stanford University).



Příklady



Figure 3
Longitudinal acoustic wave (50 MHz) image at 10 times, of Lincoln's head on the obverse surface of a US penny (courtesy of E. Lynk, General Electric Company).

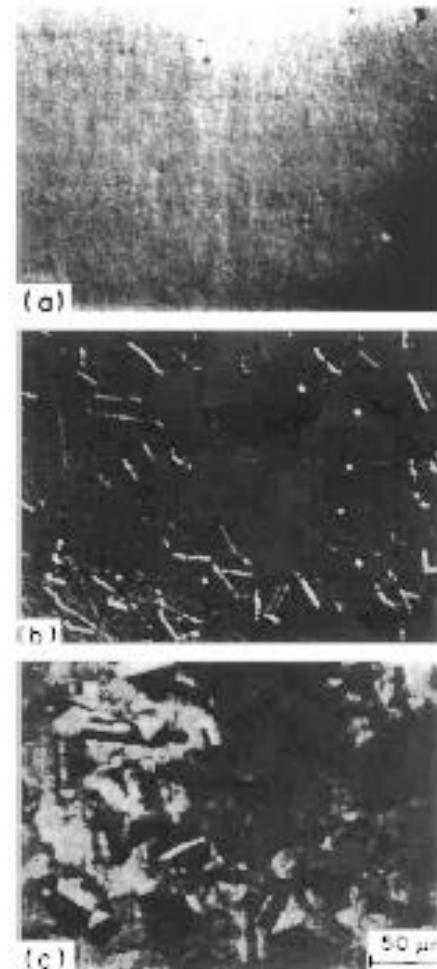
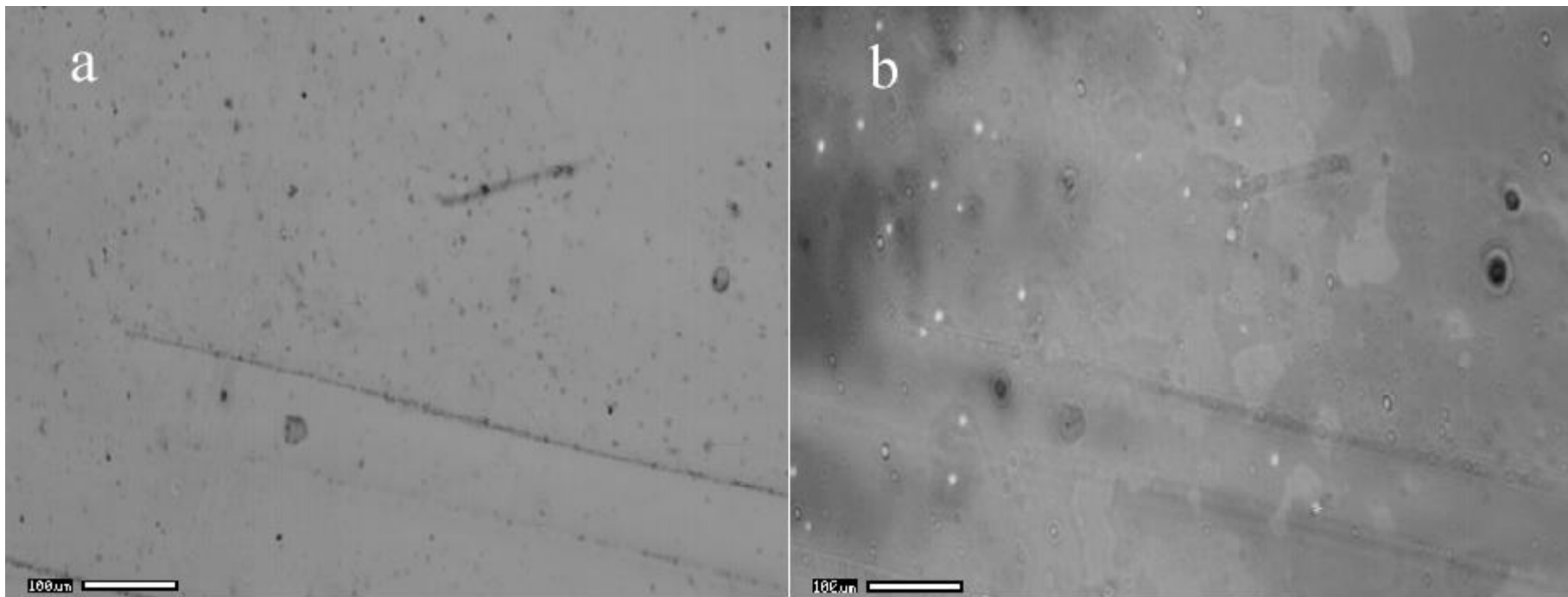
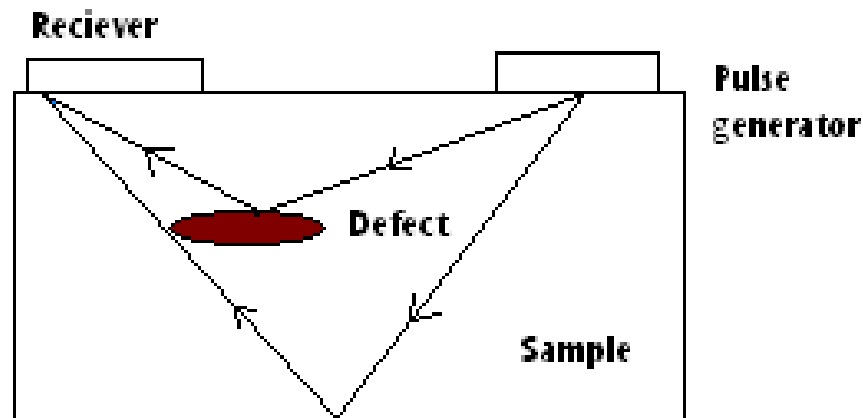


Figure 2
Images of grain structure in Inconel: (a) optical image, (b) optical image etched, and (c) 2.7 GHz acoustic image of the same region (courtesy of L. Lam, Stanford University, CA).



Skenovací akustická mikroskopie epoxidové vrstvy nanesené na hliníku při frekvenci 300 MHz: (a) $Z = 0$; (b) $Z = -20 \mu\text{m}$. V podpovrchovém zobrazení jsou velmi dobře vidět dutiny při rozhraní mezi epoxidem a hliníkem.

Akustická defektoskopie a sonografie



- Jak generátor pulsů tak i přijímač se mohou pohybovat
- Jeden snímač může sloužit současně jako generátor i přijímač (piezokeramika, mikrofon/reproduktor)

Použití: defektoskopie (cizí tělesa, trhliny atd.)
 medicína (prenatální, kameny apod.)
 geofyzika, geologie (např. zkoumání
 geologických vrstev, vyhledávání ložisek)
 rybářství (hejna ryb), obrana (ponorky)

Příklady

Lékařství: používané frekvence
2,5-10 Mhz

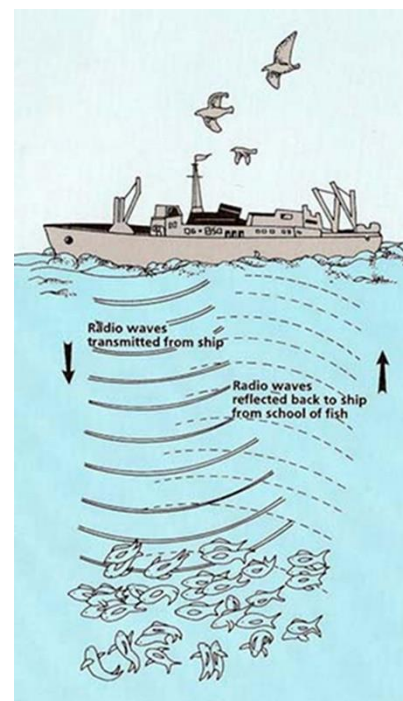


Námořní aplikace: Sonar (*SOund NAvigation and Ranging*)

Používá se v pasivním i aktivním módu.

Pasivní se používá častěji ve
vojenství – aktivní sonar lze
snadněji odhalit

Frekvence: zvuk, ultrazvuk



Vnitřní tlumení

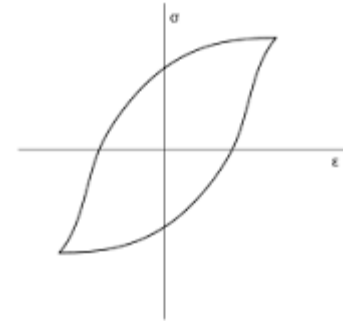
Interakce zvuku s materiálem

V důsledku interakce zvuku s defekty (rezonance) v materiálu dochází k jeho útlumu

Může být stanovena charakteristická energie defektů.

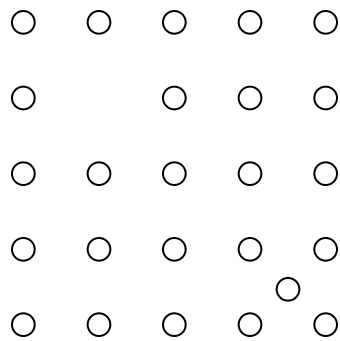
Příklady: Přeskoky intersticiálních atomů, dislokací. Vibrační módy dislokací atd.

Při útlumu dochází k přeměně mechanické energie na teplo (využití u „hidamats“ – high damping materials – materiály s vysokým tlumením, např. Mg)

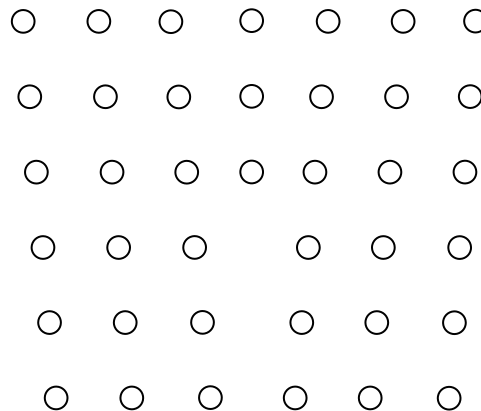


Poruchy krystalové mříže v kovových materiálech

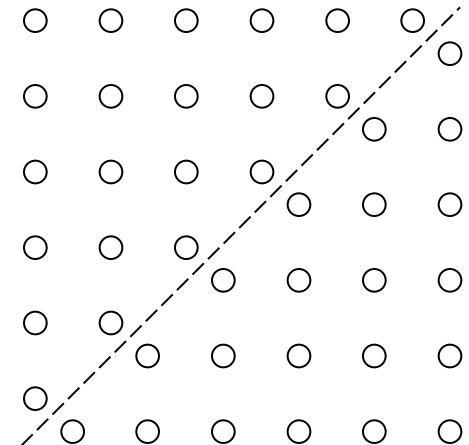
V rámci každého jednotlivého zrna jsou atomy pravidelně uspořádány v souladu se základní strukturou krystalu, nicméně může docházet k různým odchylkám, které se nazývají poruchy krystalové mříže.



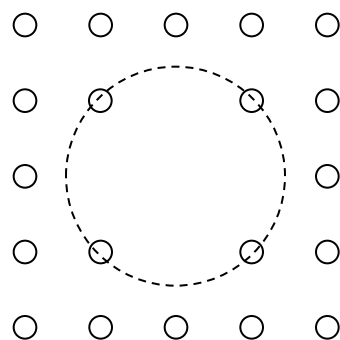
Vakance- intersticiál



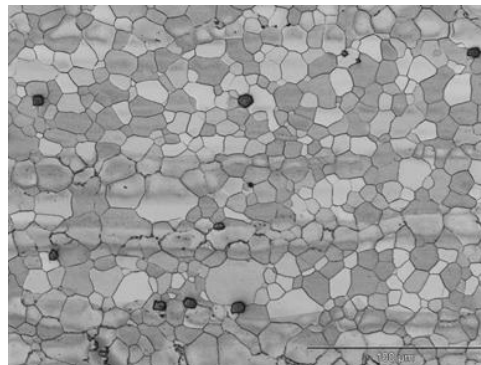
Dislokace



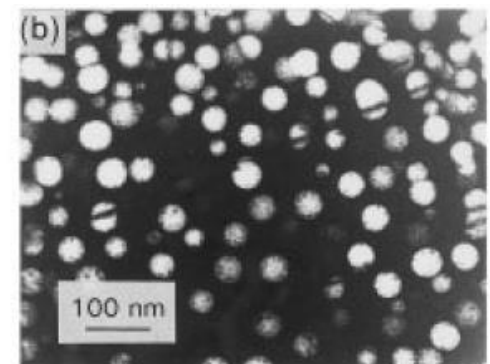
Vrstevná chyba



Dutina



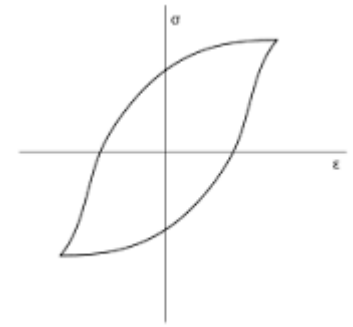
Hranice zrn ve slitině Mg



Precipitáty ve slitině AlLi¹⁰

Vnitřní ztráty

Materiál není ideálně elastický: vnitřní ztráty



Napětí vyvolané průchodem ultrazvuku: $\sigma = \sigma_0 \exp(i\omega t)$

vyvolá deformaci: $\varepsilon = \varepsilon_0 \exp(i(\omega t - \phi))$

ϕ ztrátový úhel

Komplexní poddajnost a komplexní modul

$$J^*(\omega) = \frac{\varepsilon}{\sigma} = |J(\omega)| e^{-i\phi(\omega)} \quad M^*(\omega) = \frac{\sigma}{\varepsilon} = |M(\omega)| e^{i\phi(\omega)} = \frac{1}{J^*(\omega)}$$

Reálná a imaginární část modulu J^* je spojena Kramers-Krönigovými relacemi.

Podmínky:

Nízký útlum – ultrazvuk lze použít pro kovy a vodu (do frekvence $f = 1\text{MHz}$)

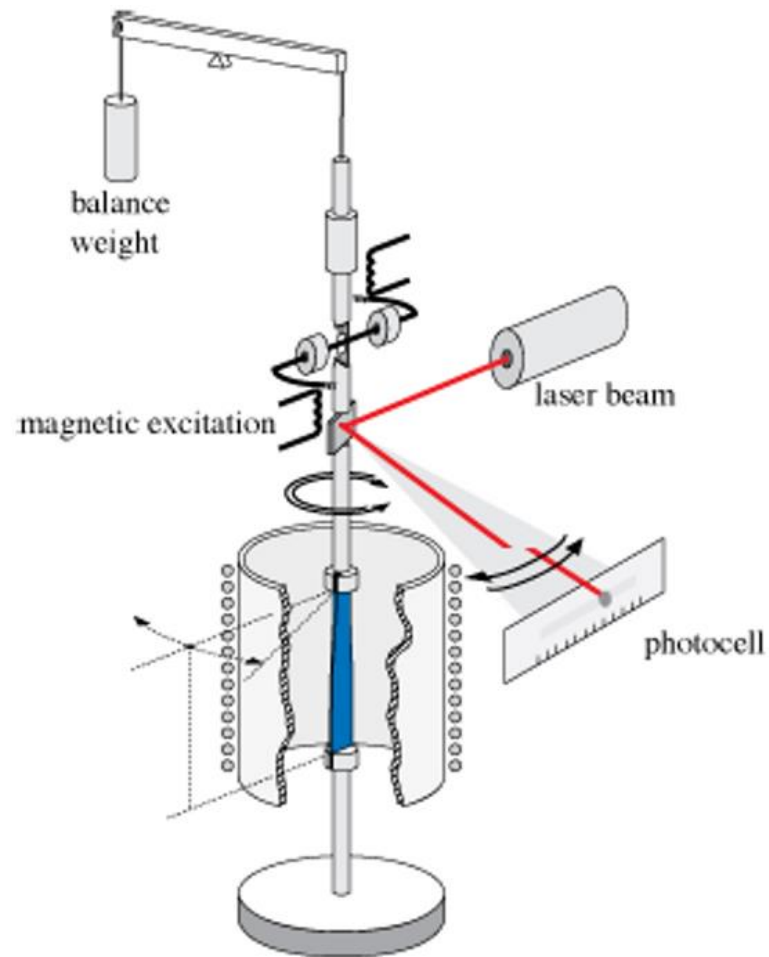
$x_{1/2}$	$f = 100\text{kHz}$	$f = 500\text{kHz}$	$f = 1000\text{kHz}$
Vzduch	2.6m	0.1m	0.026m
Voda	1400m	56m	14m
Hliník	58m	2.3m	0.58m

Ref.: Krupka, Horák: Fyzika, svazek 1, SNTL, Praha 1976

Délka dráhy v médiu, po jejímž uražení se intenzita ultrazvuku sníží na polovinu původní hodnoty.

Redukce šumu – používají se vlnové délky, které nejsou přítomny v šumu (např. mimo nízkofrekvenční hluk mechanických zařízení).

Torzní kyvadlo



Akustická emise – naslouchání mikrosvětů in vivo – během experimentu

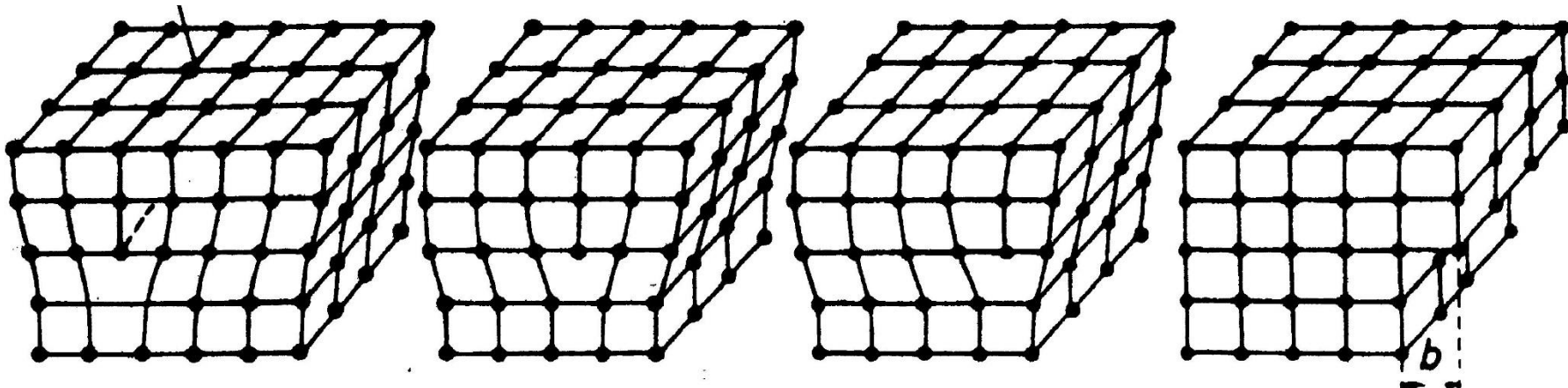
- Akustická emise je elastické vlnění, které vzniká při lokálních a nevratných změnách (mikro)struktury materiálů. Tyto změny jsou spojeny s uvolněním tepelné a mechanické energie.
- AE vzniká při řadě jevů, jako jsou zemětřesení, důlní otřesy, sesuvy půdy nebo var kapaliny v potrubí. Velmi významná je AE při plastické deformaci a porušování materiálů (kovových i nekovových). V kovových materiálech jsou zdrojem AE vznik a pohyb dislokací – tyto jevy můžeme pomocí AE detailně studovat.

Deformace kovových materiálů-koncept dislokace

Atomární struktura hranové dislokace je ukázána na následujícím obrázku zcela vlevo. Dislokaci si můžeme představit tak, že do naříznutého krystalu je vložena polorovina atomů.

Obrázek dále ukazuje, jak se dislokace pohybuje při síle působící na ní v důsledku smykového napětí v rovině skluzu. Polorovina atomů se pohybuje směrem doprava až vytvoří skluzový stupeň znázorněný na povrchu krystalu.

Stejný skluz by vytvořila dislokace vůči této dislokaci negativní, kdy by se pod rovinou skluzu pohybovala polorovina atomů doleva.

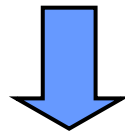


Obr. Skluz způsobený pohybem hranové dislokace

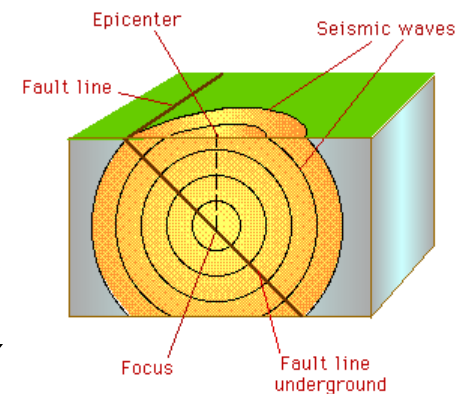
Dislokační zdroje AE

3 hlavní dislokační procesy vedou k uvolnění AE:

- Relaxace napěťových polí, která vznikají při vzniku a pohybu dislokací
- Anihilace dislokací
- Akustické brzdové záření (Bremsstrahlung) vznikající při zrychlení nebo zpomalení dislokací



- AE je detekována jako posun povrchu materiálu ΔU při výstupu elastické vlny na jeho povrch. Místo, kde elastická vlna vzniklá v důsledku nějakého procesu vystoupí nejdříve, nazýváme stejně jako u zemětřesení **epicentrem**. AE je **objemový jev**.



Kolik dislokací se musí pohybovat, abychom detekovali signál AE?

Scruby et al. (1981): Maximální amplituda posuvu povrchu vzorku U_n v epicentru vybuzená příchodem nejrychlejší (podélné) vlny způsobené simultánním růstem n dislokačních smyček v izotropním materiálu. Autoři předpokládali, že smyčky leží v hloubce D pod povrchem a svírají úhel 45° s normálou k povrchu, a dále, že smyčky rostou konstantní rychlostí v z nulového poloměru do konečného poloměru r :

$$U_n = n b r v c_s^2 / D c_L^3$$

b je přibližně mřížový parametr, c_L je rychlost šíření podélných vln zvuku a c_s je rychlost šíření příčných vln zvuku.

Pohyb izolované dislokace v běžném polykrystalickém hliníku způsobí posuv povrchu 10^{-15} m, který **nelze detekovat**.

Kolektivní pohyb nejméně 100 dislokací je nutný k vybuzení slabého detekovatelného signálu (posuv 10^{-13} m, podle studií NBS U.S.A.).

Detekovatelná AE je důkazem kooperativního (nelineárního) charakteru dislokační dynamiky! Dislokace se chovají jako dynamický systém.

Dynamický systém je daná množina prvků, spolu s množinou vazeb mezi nimi navzájem i s okolím.

Dynamický systém: systém, jehož výstup (stav) je závislý nejen na okamžitých hodnotách vstupů (a rychlosti jejich změny), nýbrž i na předcházejících hodnotách vstupů a stavů (paměť).

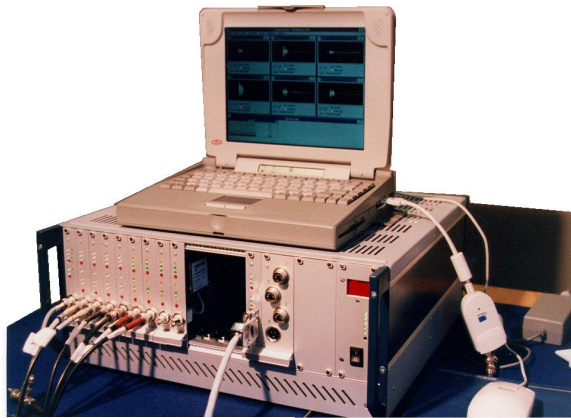
Nechá se ilustrovat na řadě příkladů včetně společenských jevů.

Dislokace v nezatíženém materiálu – změna konfigurace nemá „globální“ následky.

Po zatížení se mohou dostat do stavu, kdy malá změna konfigurace může vyvolat velkou odezvu – lavinovitý pohyb dislokací, puls AE a plastickou deformaci či lom materiálu (**kritický stav**).

Důležitý parametr – vnitřní měřítko systému. Lze ilustrovat na chování sněhových lavinových polí.

Experimentální technika AE



Jednoduchá konfigurace systému pro detekci AE (PC a 19" XEDO jednotka).



Piezokeramický snímač AE s vestavěným předzesilovačem.

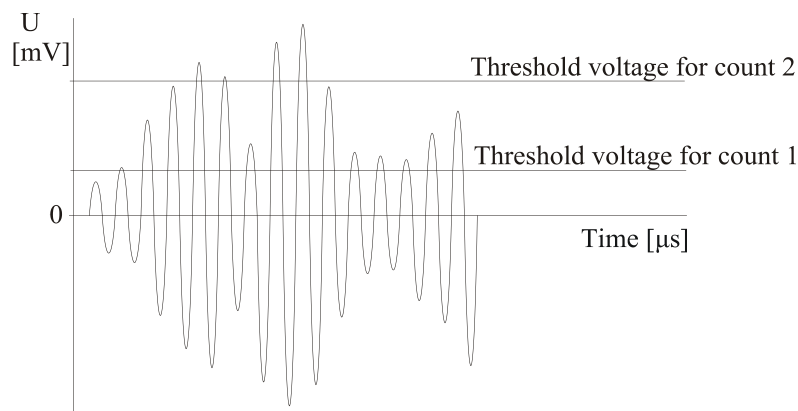
DAKEL-XEDO, DAKEL-ZD Rpety, CZ

Parametrizace signálu AE

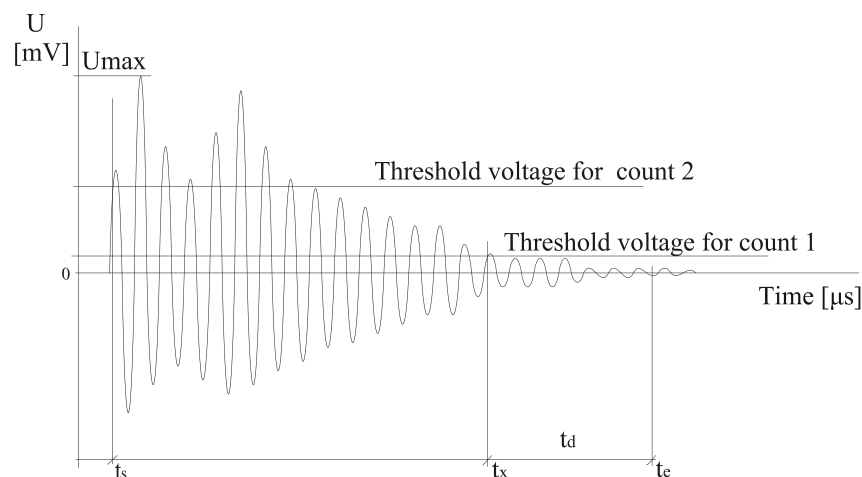
Dva základní typy signálu AE:

Spojitá emise: události s nízkou energií produkované současně velkým počtem zdrojů – signál má náhodný charakter.

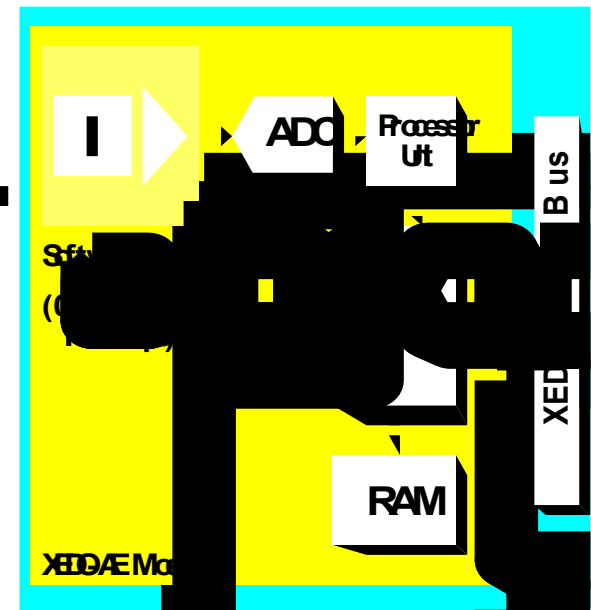
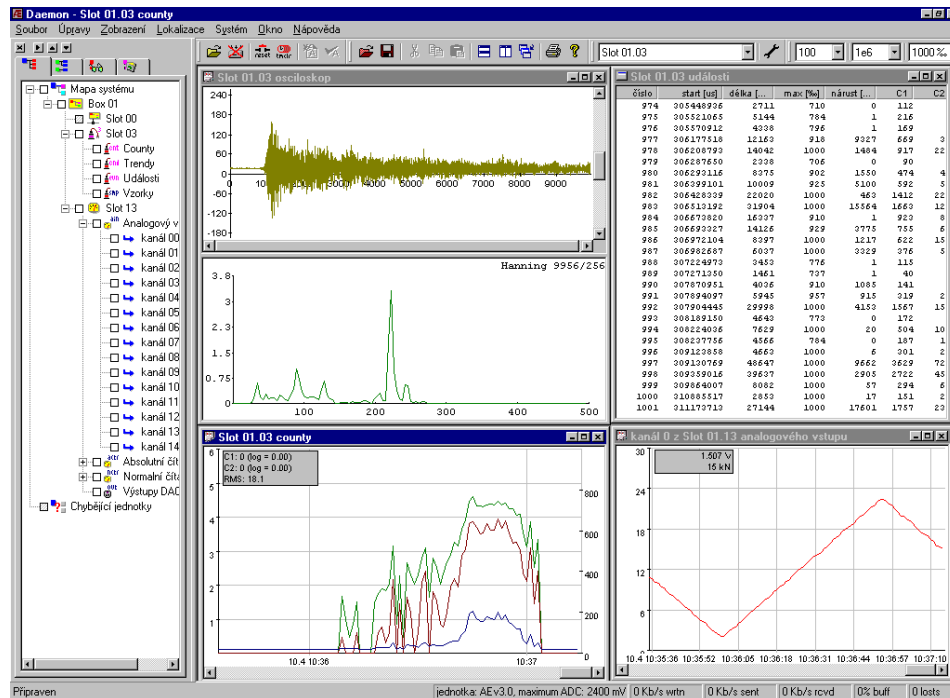
Nespojitá emise (burst): vznik elastických vln má lavinový charakter, uvolněná energie může být až o 10-14 řádů vyšší než u spojité emise.



Detekce spojité emise.



Detekce nespojité emise.



Digitální zpracování signálu AE

- spojitě načítání emisních překmitů přes dvě prahové úrovně
- efektivní (RMS) napětí AE
- spojitě načítání událostí AE (volitelná definice události AE)

Základní parametry AE

Absolutní čas příchodu, doba trvání události, max. amplituda, počet emisních překmitů v události AE, čas do maxima, energie AE, frekvenční analýza

Záznam části signálu (osciloskop)

Měření AE

Zisk předzesilovače 26 dB
Celkové zesílení 94 dB
Dvě prahové úrovně 730 mV a 1450 mV,
RMS šumu na výstupu 46mV.
Mrtvá doba 1 ms.