



O materiálech aneb cesta do nitra krystalové mříže

Doc. RNDr. František Chmelík, CSc.

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

Požadované vlastnosti strukturních materiálů

Nízká hustota

Mikrostrukturní stabilita

Pevnost (mez kluzu, mez pevnosti)

Tažnost (schopnost tváření)

Vysoké tlumení

Schopnost absorbovat energii při impaktu

Korozivzdornost

Speciální požadavky

PŘEHLED ZÁKLADNÍCH MATERIÁLŮ PRO STRUKTURNÍ APLIKACE

Kovové materiály

- Materiály na bázi Fe (železa a oceli, obsah C a dalších legur, termomechanické zpracování).
- Al a slitiny (vytvrditelné, nevytvrditelné)
- Ti a slitiny
- Slitiny na bázi Mg
- Cu a slitiny (mosazi, bronzы)
- Materiály pro speciální aplikace (pájky bez Pb, intermetalika, ušlechtilé kovy, ochuzený uran, kovová skla, amorfnní kovové materiály, kovové pěny) apod.

Hybridní materiály

- Kompozity, typicky kovová matrice a nekovová zpevňující fáze (např. SiC-Al)

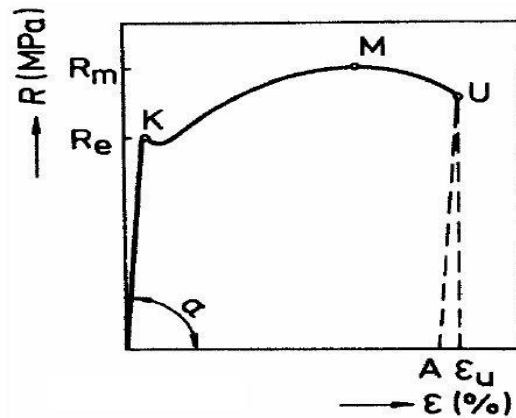
Nekovové materiály

- Skla
- Keramiky
- Polymery
- Dřevo
- Hybridní materiály (kompozity, např. plast a skleněná vlákna apod.)

MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOVOVÝCH MATERIÁLŮ

PRO STRUKTURNÍ APLIKACE

ELASTICITA, PLASTICITA A LOM



R_e – mez kluzu

R_p – smluvní mez kluzu – odpovídá trvalé deformaci 0,2% z délky L_0

R_a – mez úměrnosti

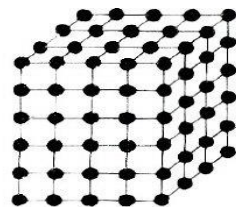
R_m – mez pevnosti

R_{he} – horní mez kluzu

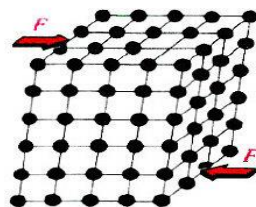
R_{de} – dolní mez kluzu

E – modul pružnosti

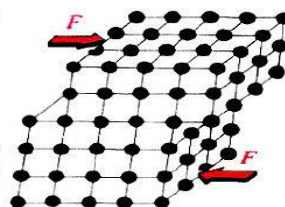
$$E = \tan \alpha$$



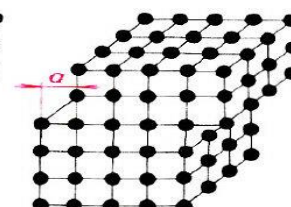
výchozí krystal



pružné deformace



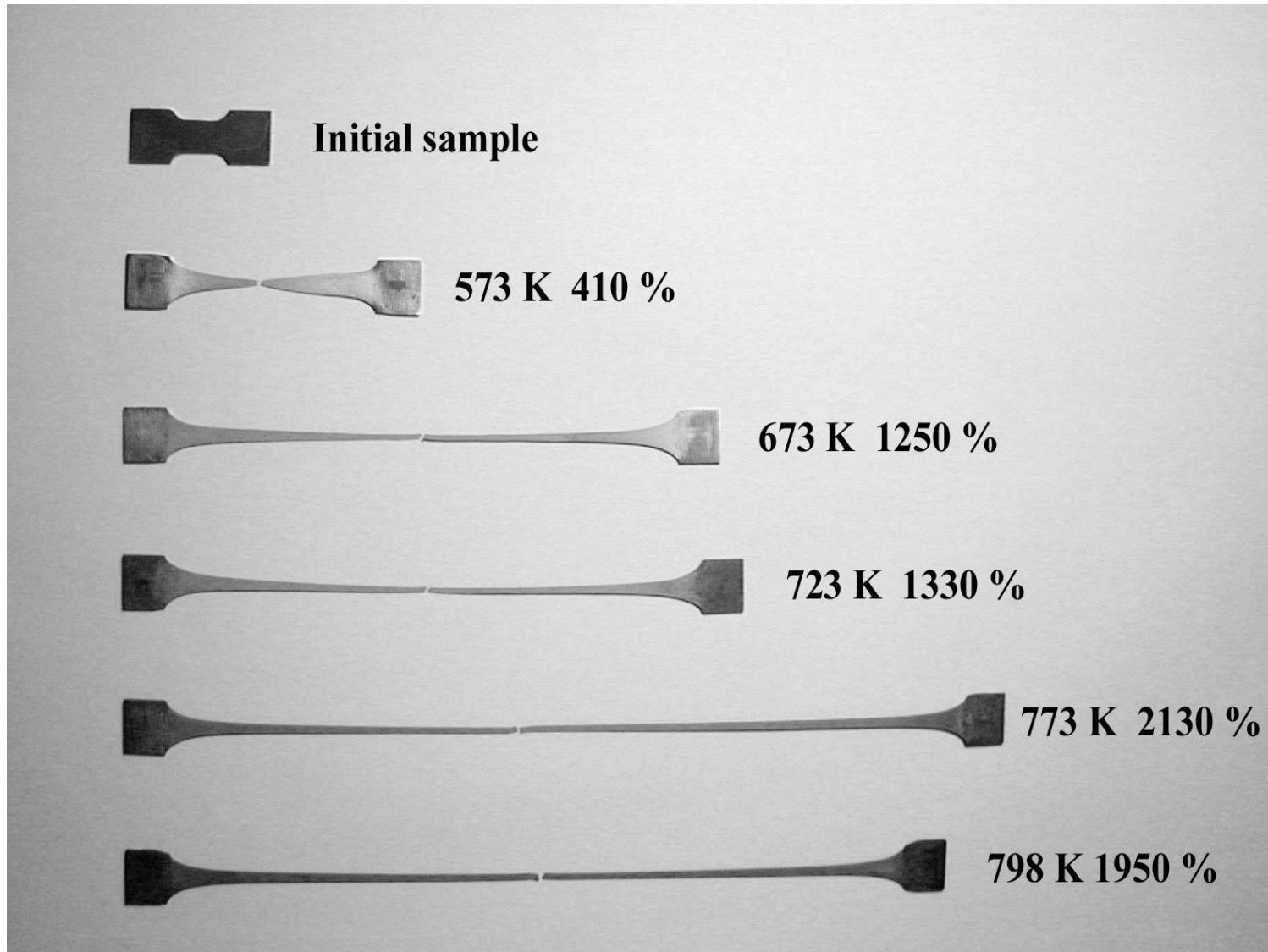
zvětšení pružné deformace v plastickou

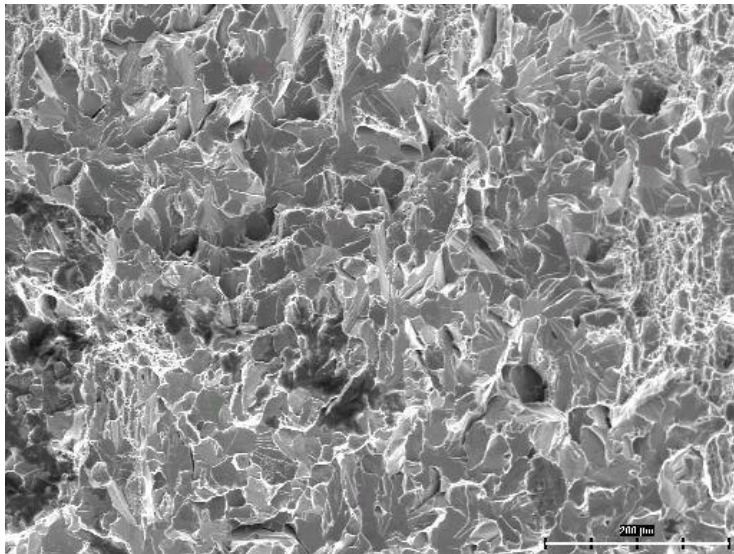


po odlehčení zůstává deformace plastická (trvalá)

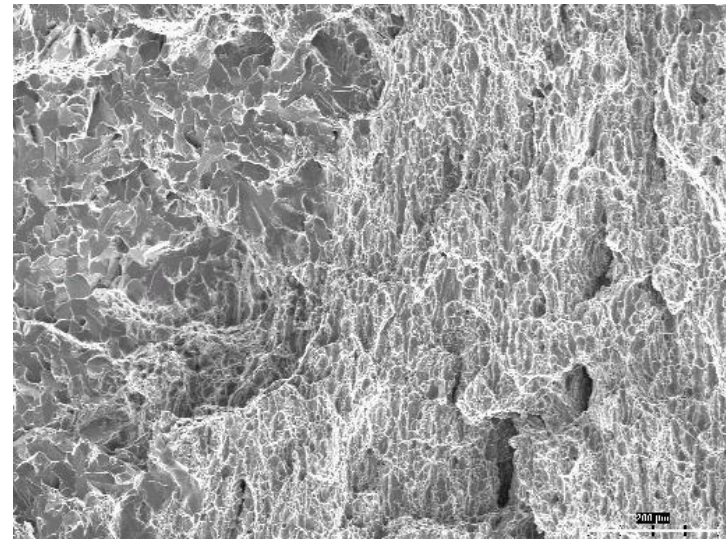
Schéma pružné (elastické) a trvalé (plastické) deformace

Plasticita a superplasticita Al-4.5%Mg-0.2%Zr-0.2%Sc

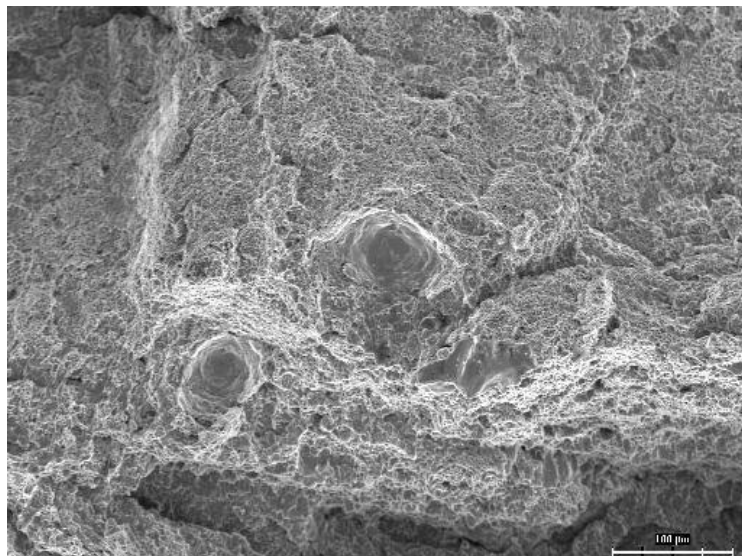




Křehký lom – nízké teploty



Náhlý přechod mezi
křehkým a tvárným lomem



Tvárný lom – vyšší teploty

Lom v oceli



**ALOHA AIRLINES,
FLIGHT 243
BOEING 737-200,
NEAR MAUI, HAWAII
APRIL 28, 1988**



Příčinou poškození
únavová trhlina v trupu
letadla



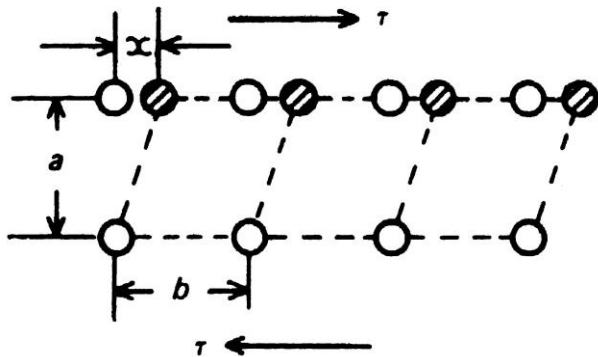
Vlakové neštěstí u
Eschede, Dolní Sasko,
Německo

3.6. 1998

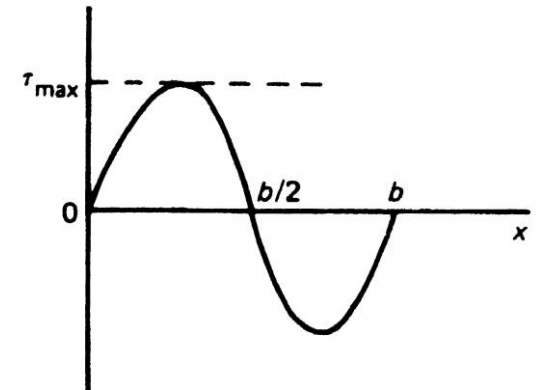


Příčina: prasklá obruč kola
v důsledku únavy
materiálu

Deformace kovových materiálů-teoretická pevnost



*Skluz rovin
krystalu a skluzové
napětí v závislosti
na posunutí.*



Teoretickou pevnost ve smyku perfektního krystalu určil poprvé Frenkel pro jednoduchou pravoúhlou mřížku na obrázku. Smyková síla potřebná k posunutí jedné roviny atomů oproti druhé rovině nacházející se ve vzdálenosti a bude periodická, protože pro posunutí $x < b/2$ kde b je vzájemná vzdálenost atomů ve směru smyku, mřížka působí proti aplikovanému napětí, zatímco pro $x > b/2$ síly v mřížce pomáhají aplikovanému napětí.

Nejjednodušší funkce, která má tyto vlastnosti je sinusovka ve tvaru

$$\tau = \tau_m \sin (2\pi x/b) \approx \tau_m 2\pi x/b$$

kde τ_m je maximální smykové napětí při posunutí $b/4$. Pro malá posunutí je elastická smyková deformace rovná poměru τ /G z Hookova zákona, kde G je modul pružnosti ve smyku, takže můžeme psát

$$\tau_m = (G/2\pi)b/a$$

a vzhledem k tomu, že $b \approx a$, je teoretická hodnota pevnosti ve smyku u dokonalého krystalu řádu $G/10$ (hliník asi 2600 MPa).

Z provedeného výpočtu vyplývá, že krystaly by měly být značně pevné a obtížně deformovatelné, ale zjevnou vlastností reálných monokrystalů je jejich měkkost, ze které vyplývá, že kritické smykové napětí pro dosažení skluzu je velmi malé (hliník – jednotky MPa).

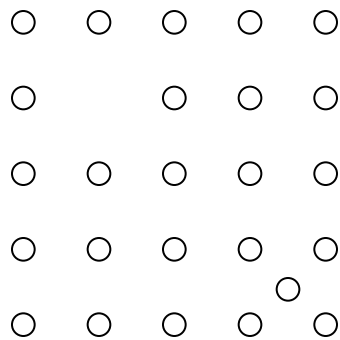
Tento rozpor mezi teoretickou a experimentální pevností krystalu lze vysvětlit tím, že atomové roviny po sobě vzájemně neklouzají jako pevná tělesa, ale skluz začne v určité ohraničené oblasti v rámci struktury a následně se postupně šíří dále zbytkem příslušné roviny.

Obecně je tedy možné skluzovou rovinu rozdělit na dvě oblasti - oblast, kde už došlo ke skluzu a oblast, která je dosud bez skluzu.

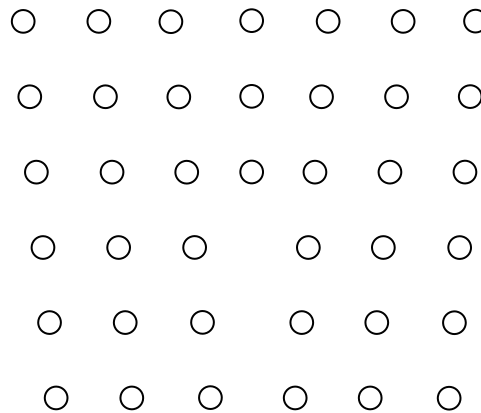
Tento mechanismus je podmíněn přítomností poruch krystalové mříže, zejména čarových nespojitostí (koncept dislokací). Ostatní poruchy mohou průběh deformace významně ovlivňovat.

Poruchy krystalové mříže v kovových materiálech

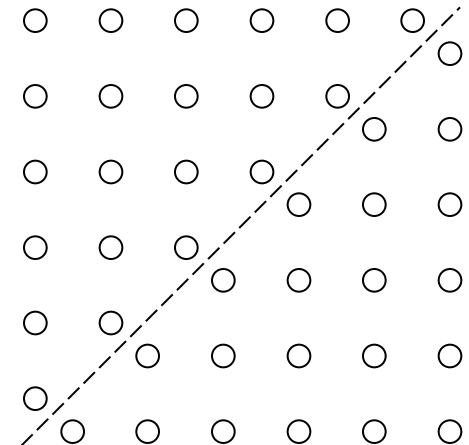
V rámci každého jednotlivého zrna jsou atomy pravidelně uspořádány v souladu se základní strukturou krystalu, nicméně může docházet k různým odchylkám, které se nazývají poruchy krystalové mříže.



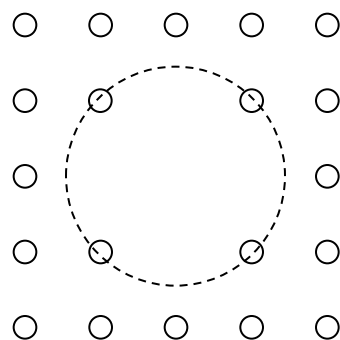
Vakance- intersticiál



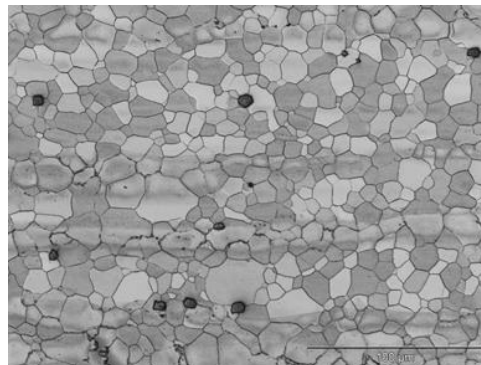
Dislokace



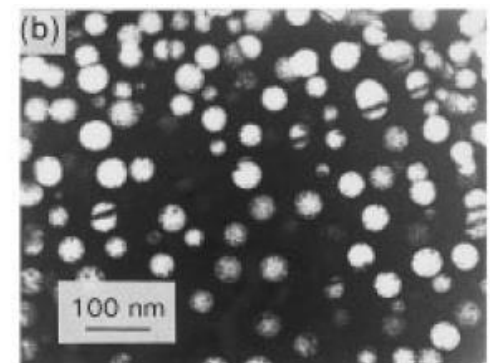
Vrstevná chyba



Dutina



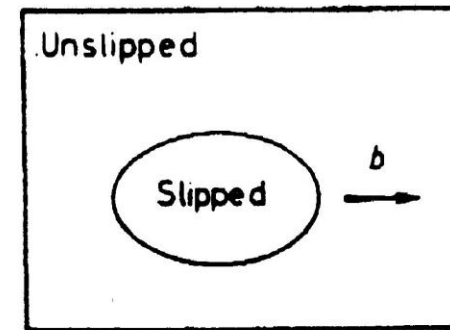
Hranice zrn ve slitině Mg



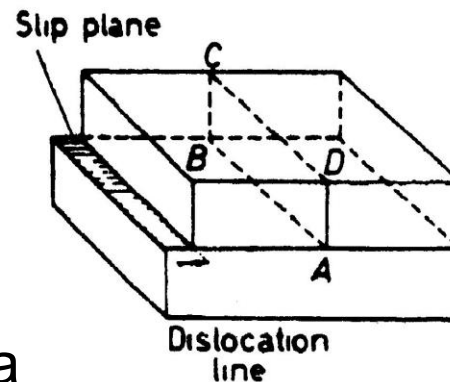
Precipitáty ve slitině AlLi¹²

Deformace kovových materiálů-koncept dislokace

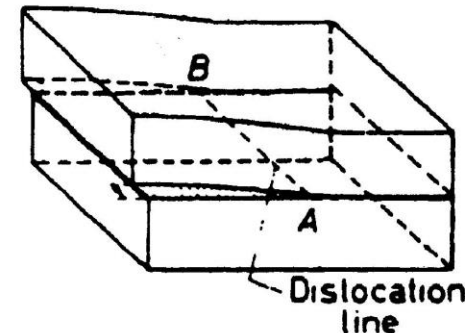
Mezi deformovanou a ne-deformovanou oblastí bude nespojitost. Tato hranice je dislokační čára neboli dislokace.



(a)



(b)



(c)

- Dislokace je čarová porucha
- Dislokace je uzavřená smyčka uvnitř krystalu nebo vystupuje na povrch
- Rozdíl v hodnotě skluzu podél čáry dislokace je konstantní

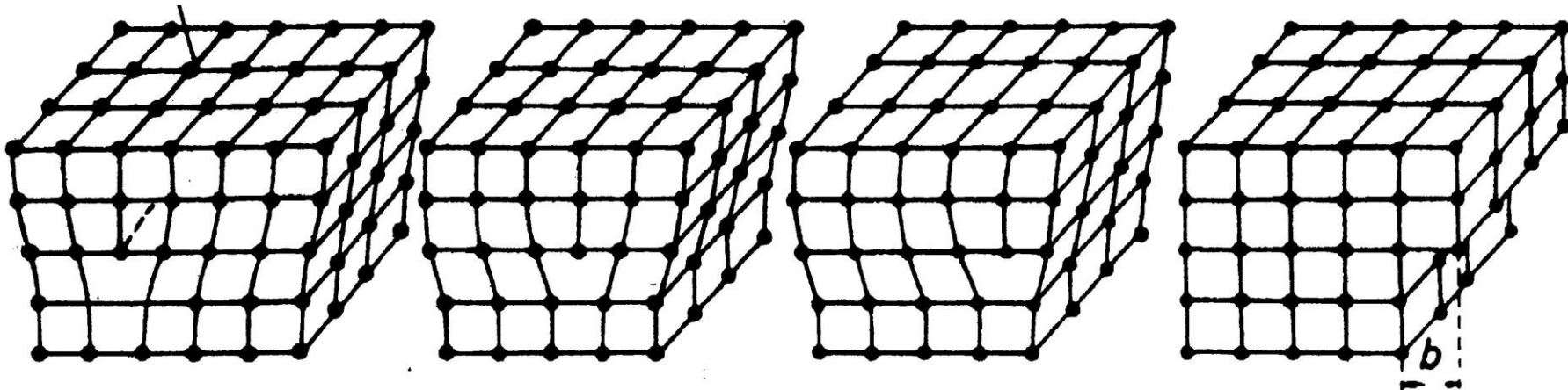
Obr. Schématická znázornění dislokační smyčky (a), hranové (b) a šroubové dislokace (c)₁₃

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.

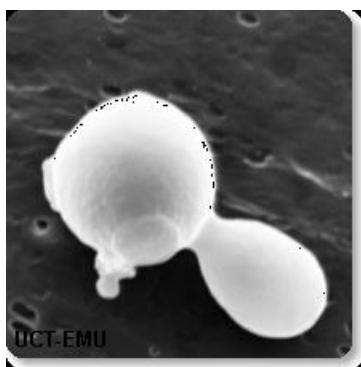
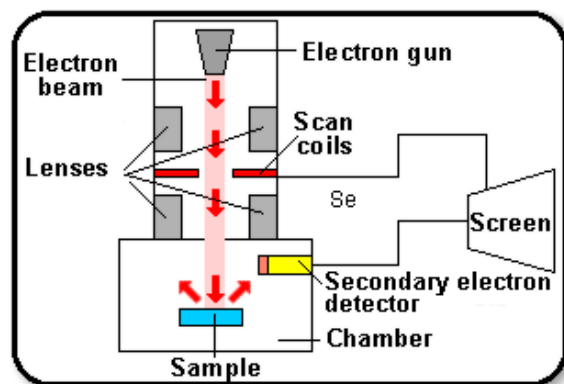
Obrázek dále ukazuje, jak se dislokace pohybuje při síle působící na ní v důsledku smykového napětí v rovině skluzu. Polorovina atomů se pohybuje směrem doprava až vytvoří skluzový stupeň znázorněný na povrchu krystalu.

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

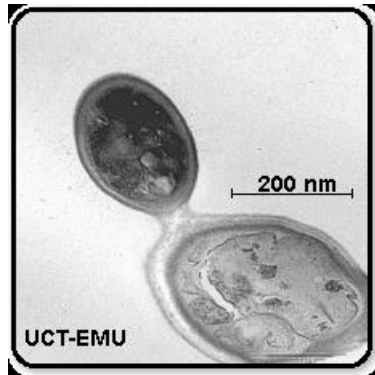
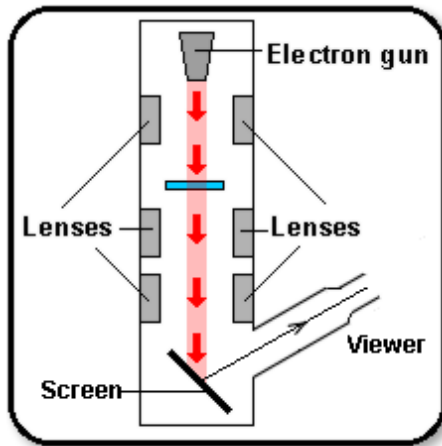
Elektronová mikroskopie – pozorování mikrosvětá post mortem, skenovací režim



Rozlišení až 2 nm, zvětšení až 200 000x

Množící se kvasinka, zv. 32 000x

Elektronová mikroskopie – pozorování mikrosvěta post mortem, transmisní režim



Rozlišení až 0,2 nm, zvětšení až 500 000x

Množící se kvasinka - vrstva,
zv. 32 000x

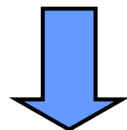
Akustická emise – naslouchání mikrosvětů in vivo – během experimentu

- 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.

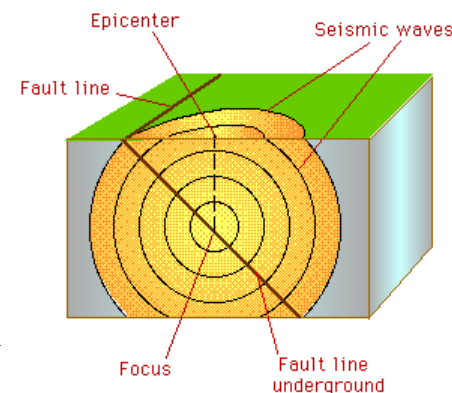
Dislokační zdroje AE

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**.



Obr.1

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).

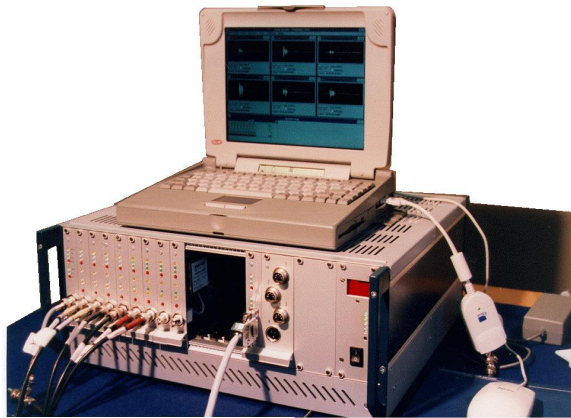
Nechá se ilustrovat na řadě příkladů včetně společenských jevů.

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



Obr.2: Jednoduchá konfigurace systému pro detekci AE (PC a 19" XEDO jednotka).



Obr.3: Piezokeramický snímač AE s vestavěným předzesilovačem.

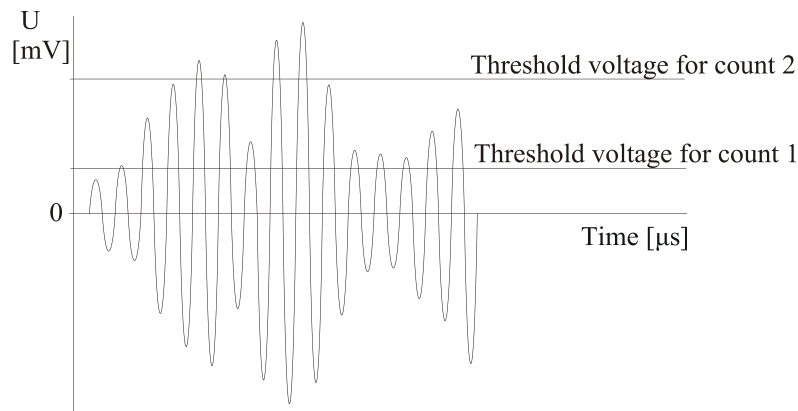
DAKEL-XEDO, DAKEL-ZD Rpety, CZ

Parametrizace signálu AE

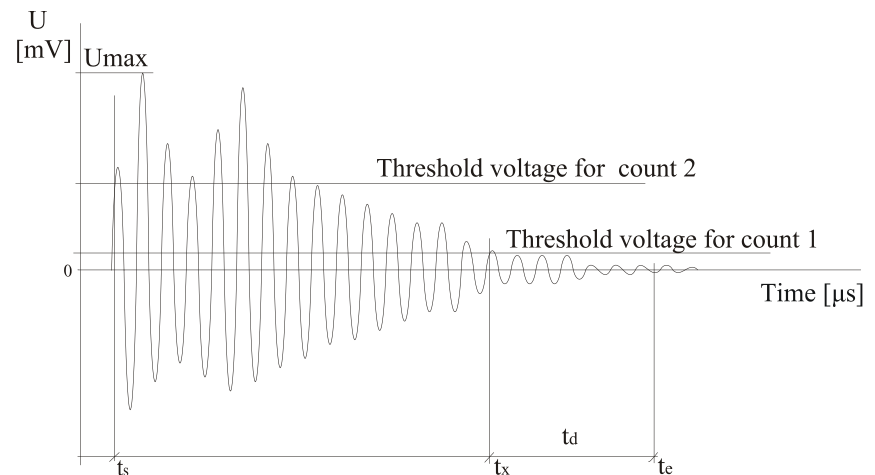
Dva základní typy signálu AE:

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

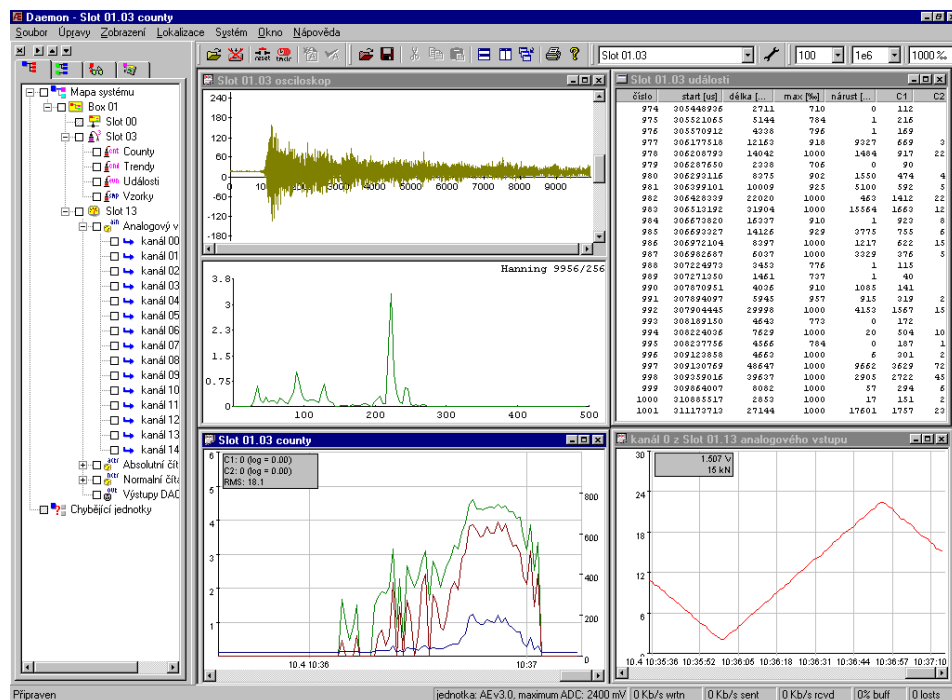
Nespojitá emise (burst): vznik elastických vln má lavinový charakter, uvolněná energie může být až o 10-14 řádů vyšší než u spojité emise.



Detekce spojité emise.



Detekce nespojité emise.



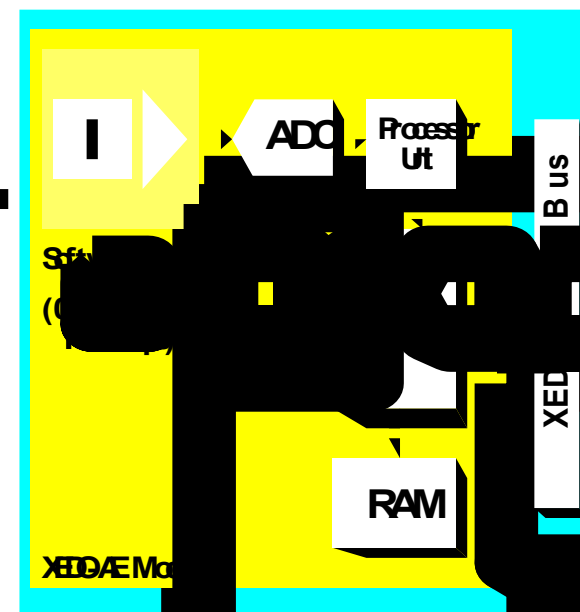
Obr. 3. Digitální zpracování signálu AE

- 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)



Obr. 4. 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.

Demonstrace

- **Návštěva laboratoře elektronové mikroskopie**
- **Návštěva laboratoře mechanických vlastností – deformační zkouška hořčíkové slitiny s měřením akustické emise**