

Akustická emise (AE) - teorie a praxe provozních kontrol konstrukcí

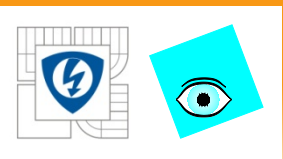
RNDr Miroslav Přibáň PhD



25. května 2012



Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

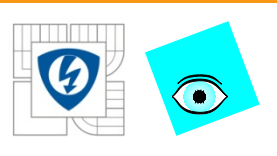


AKUSTICKÁ EMISE – SEZNAMTE SE...

25.5.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Akustická emise – seznamte se...

Akustická emise - Fyzikální jev / Akustická emise – měřicí (NDT) metoda.

Pojem „**akustická emise**“ se objevil v letech ve fyzikálních laboratořích při studiu plastické deformace kovů. Byl tak nazván **fyzikální jev**, kdy plastickou deformaci kovů doprovází akustické popraskávání či akustický šum vznikající uvnitř materiálu v průběhu plastické deformace (pohybu dislokací) – Joseph Kaiser.

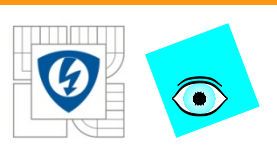
Akustická emise - fyzikální jev emitující elastické napěťové vlny generované dynamickým uvolněním mechanického napětí uvnitř materiálu tělesa nebo procesem působícím vznik elastických napěťových vln na povrchu tělesa.

Lezu-li na strom – praskání výstraha !!!

Nasloucháním větve snižuji Riziko (pravděpodobnost závažného následku – úrazu)

$$\text{Risk} = \text{POF} \times \text{COF}$$

V 60-tých letech se v USA objevují první aplikace metody AE jako NDT metody monitorování tlakových nádob při tlakových zkouškách.



Akustická emise – seznámte se...

Existuje mnoho fyzikálních jevů, jež mohou vyvolat v tělesech vznik elastických napěťových vln. Od nespojitých poskoků dislokací při plastické deformaci, přes dekohezi či lom nekovových složek struktury materiálu (vměstky, cementit, vlákna v kompozitech), iniciace mikrotrhlin a mikroposkoky čela makrotrhlin, lom či dekoheze povrchových vrstev (např. kozoní vrstvy), rozevírání stěn trhliny, vzájemné tření, posuvy, drhnutí ploch, klepání volných resp. uvolněných částí, eroze, kavitace, var, elektrochemická koroze, šum a “syčení” turbulence při úniku kapalného či plynného média přes netěsnost, fázové transformace v materiálech např. martenzitické, AE při přemagnetovávání materiálu při poskocích Blochových stěn (magnetostrikce), kůrovec ve dřevě, šelesty na plicích...

to vše a zajisté ještě mnoho dalšího lze označit a detekovat jako akustickou emisi.

Podobně jako existuje různorodost zdrojů, existuje i různorodost charakteristik zvukových projevů od časové reprezentace (cvak, křup, chrrrousst, ssssykot...), přes reprezentaci frekvenční (AE detekujeme ve frekvenčních pásmech cca od jednotek kHz do cca 1MHz)

až po časovofrekvenční reprezentaci detekovaného signálu AE v rámci Advanced Signal Processing.

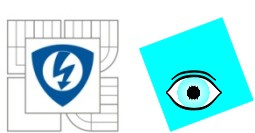
Podobně jako existuje různorodost zdrojů existuje i různorodost aplikací AE.

Přičemž z hlediska konkrétní aplikace lze rozdělit zdroje na

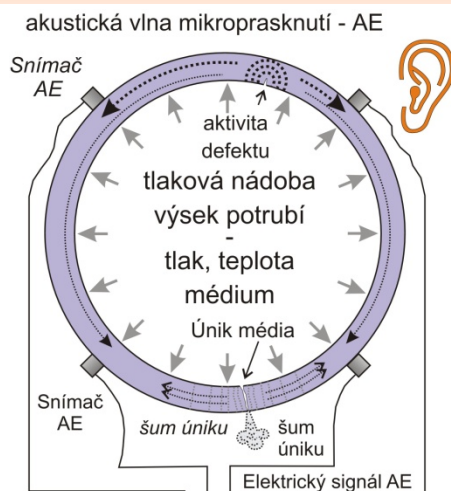
primární – cílové zdroje, na jejichž detekci zaměřujeme monitorování AE

sekundární - rušivé zdroje, jež doprovázejí aplikaci a ruší, komplikují, překrývají až znemožňují detekci primárních – cílových zdrojů a mechanismů...

My se však zaměříme na AE při plastické defromaci a porušování ocelových konstrukcí.

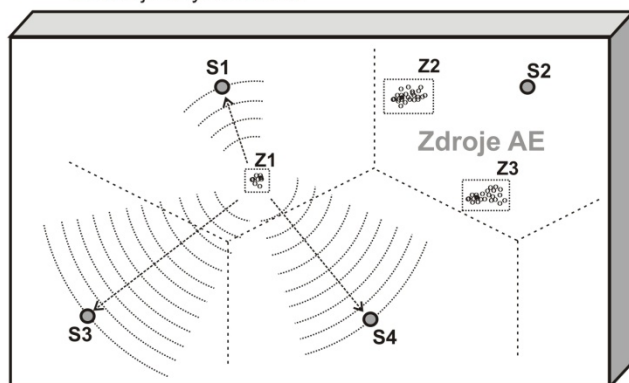


Akustická emise – seznámte se...

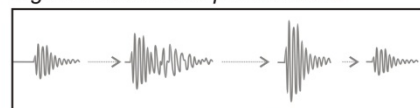


Vícekanálový měřicí systém AE

Přenosová-měřicí trasa signálu-informace AE od zdroje k vyhodnocení.



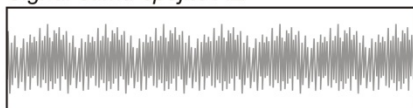
Signál hitů událostí praskavé AE



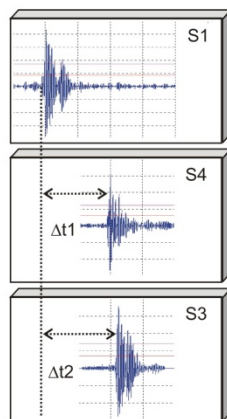
Nespojitá AE má charakter časově jasné rozlišitelných událostí AE. Analogií může být padání jednotlivých izolovaných zrníček písku na desku.

Spojité AE má charakter šumu vzájemně se překrývajících vln mnoha událostí AE. Analogií může být trvalé sypaní písku na desku, jež vytváří akustický šum.

Signál šumu spojitě AE



Princip planární lokalizace jedné praskavé události AE na základě časového zpoždění příchozů detekce hitů AE do různých míst sítě snímačů AE a následné shlukování bodů lokalizovaných událostí AE do shluků - zdrojů AE. Šestiúhelníky kolem snímačů - zóny zonální lokace AE.



Metodou AE nazýváme metodu detekce jevu – mechanismu, procesu, zdroje akustické emise, následně elektronické zpracování detekovaného signálu AE a konečně též vyhodnocení parametrů detekovaného signálu AE.

Přenosovou trasu AE reprezentuje řetězec :

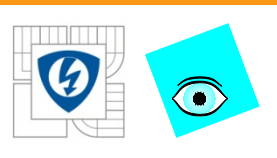
-Zdroj/jev AE - šíření elastických napěťových vln tělesem od zdroje k místu detekce

- detekce vln snímačem AE z povrchu tělesa
- přenos a analogové zpracování elektrického signálu AE
- vyhodnocení elektrického signálu AE v měřicím systému AE.

Barevně zvýrazněné body tvoří jednu měřicí trasu (měřicí kanál) AE

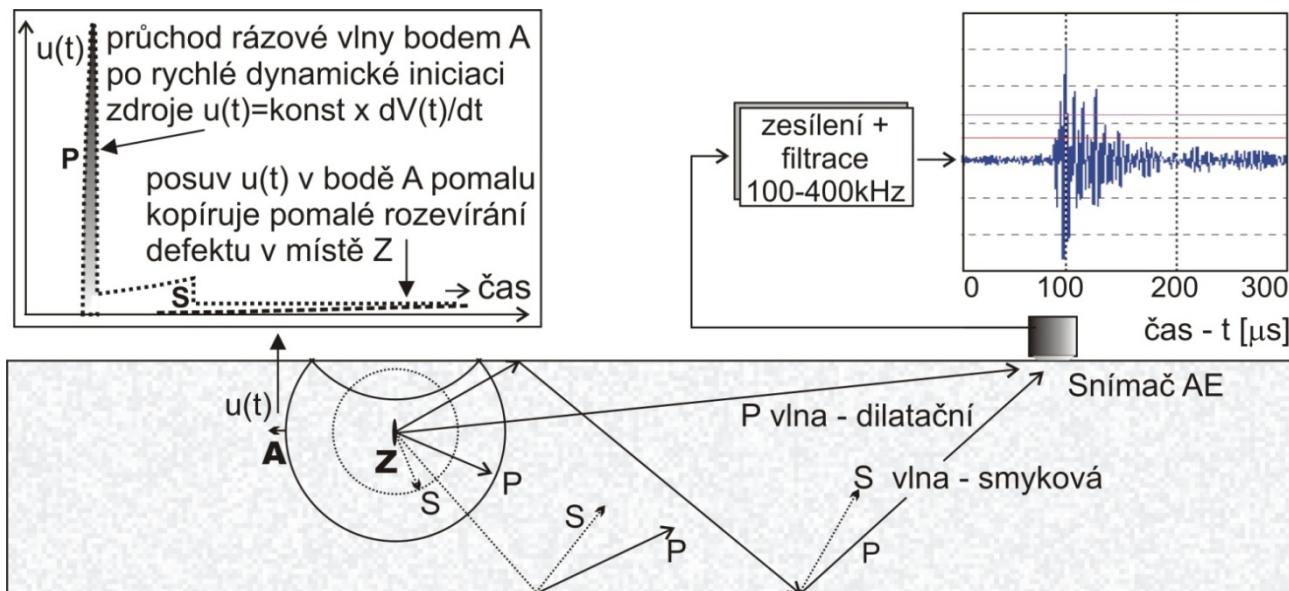
Měření – zkouška AE obvykle zahrnuje osazení monitrovaného objektu větším počtem měřicích tras a vyhodnocení detekovaného signálu vícekanálových měřicím systémem AE.

Vzdálenost snímačů na objektu až metry
Délka vedení kabelových tras až stovky metrů



Akustická emise – seznamte se...

Princip vysoké citlivosti detekce AE.



Oproti pomalému posuvu vyvolá dynamický poskok defektu vlnu, jež je detekovatelná ještě daleko od místa vzniku podobně jako zemětřesení či tsunami.

Dynamická měření umožňují řádově citlivější detekci posuvů než statická. Citlivost detekce dynamických posuvů AE činí 10^{-12} až 10^{-14} m.

Úroveň externího průmyslového rušení

Nárůst útlumu pokles dosahu

Vibrodiagnostika Akustická emise Ultrazvuk

Zvuk slyšitelný lidským uchem

10Hz 100Hz 1kHz 10kHz 100kHz 1MHz 10MHz

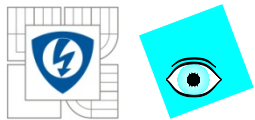
Frekvenční rozsah měření AE

Krajní rozsah 1kHz až 1MHz

Obvyklý rozsah

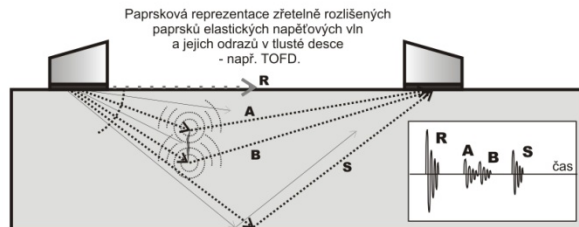
30 kHz až 400kHz

Konkrétní pásmo závisí na úrovni LowFreq. rušení
útlumu HighFreq. vln

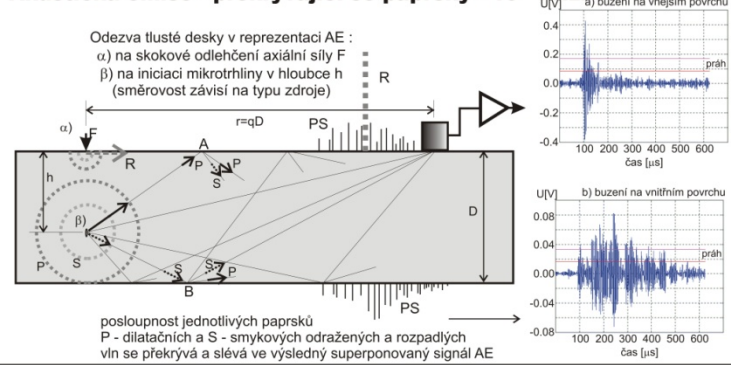


Akustická emise – seznámte se...

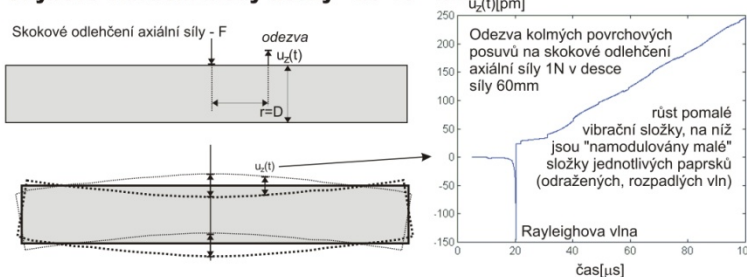
Ultrazvuková defektoskopie - frekvence > 10 kHz.



Akustická emise - překrývající se paprsky - 10 kHz.

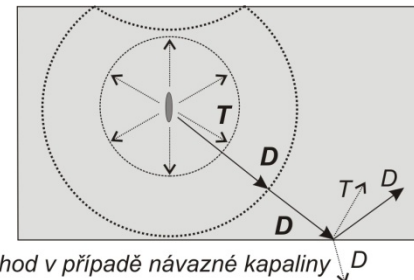


Ohybové vibrační módy desky - do 10 kHz.



V metodě AE využíváme podobně jako v UZ prvotně paprskové reprezentace (vlnoplochy, paprsky...), ale musíme více zohlednit vlnový charakter a „vlnové efekty“ (např. disperze, typy vln...)

a) Paprsky objemové-kulových vlnoploch D a T vln vyzářené ze zdroje do objemu tvořené paprsky ve směru šíření vlnění. Na rozdíl od kapalin, kde se šíří pouze dilatační vlny D se v pevných tělesech šíří dva typy vln dilatační (podélné) vlny D a příčné vlny T . Hustota energie nesená v kulovou vlnoplochou klesá díky zákonu zachování celkové energie úměrně růstu plochy jako r^{-2} . Paprsky D i T vln se při dopadu na hranici odrážejí a rozpadají. (Případně přecházejí do sousedního prostředí).



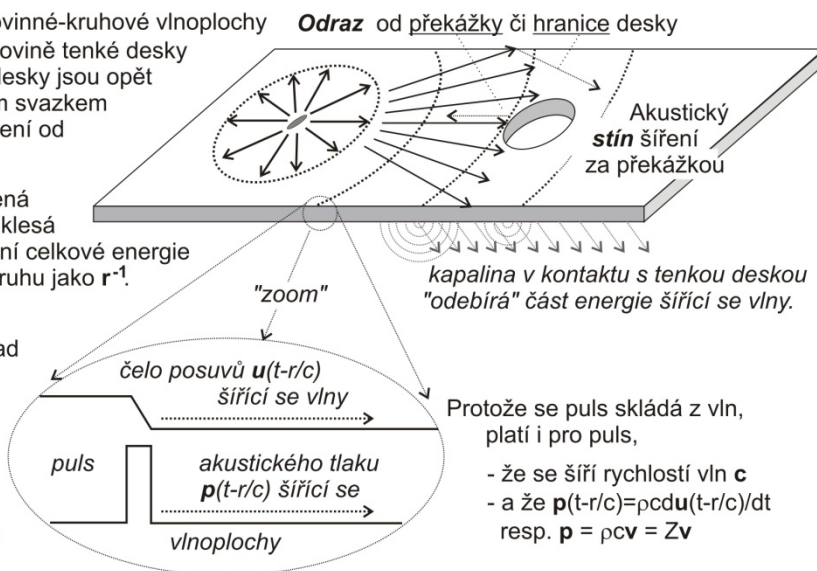
b) Paprsky plošné-rovinné-kulové vlnoplochy akustického pulsu v rovině tenké desky či na povrchu tlusté desky jsou opět tvořeny všesměrovým svazkem paprsků ve směru šíření od působení zdroje AE.

Hustota energie nesená v kruhové vlnoploše klesá díky zákonu zachování celkové energie úměrně růstu délky kruhu jako r^{-1} .

c) Idealizovaný příklad rozložení:

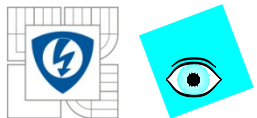
- posuvů $u(t-r/c)$ a
 - akustického tlaku $p(t-r/c)$

ve vlnoploše šířící se od zdroje AE

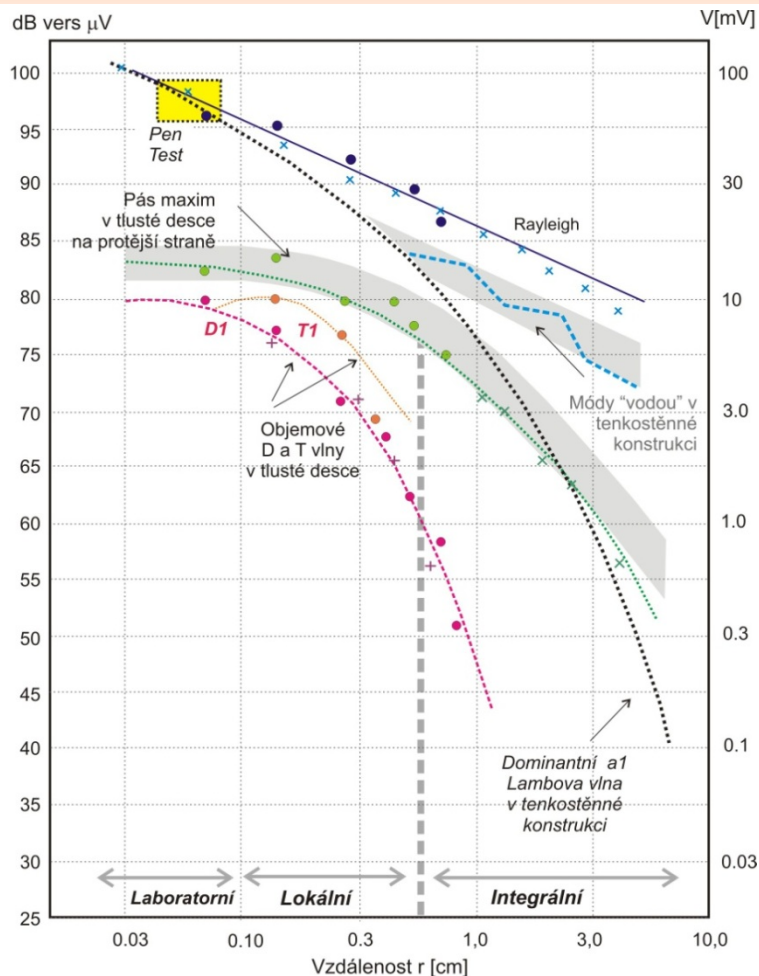


Protože se puls skládá z vln, platí i pro puls,
 - že se šíří rychlostí vln c
 - a že $p(t-r/c) = \rho c du(t-r/c)/dt$ resp. $p = \rho c v = Zv$

25.5.2012



Akustická emise – Detekovatelnost



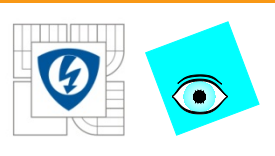
Obr.3.4: Výsledky kalibrace a měření útlumů maxim amplitud Pen Testu v tělesech konstrukcí různé geometrie.

Detekovatelnost zdroje AE je komplexní výslednicí řady faktorů od vlastní intensity zdroje (uvolněná energie AE a její frekvenční složení), přes pokles signálu AE při jeho šíření od zdroje ke snímači až po citlivost detekce měřicí trasou AE. Zásadní roli hraje též úroveň akustického rušení v tělese...

Detekovaná amplituda Pen Testu v závislosti na vzdálenosti od snímače AE (závisí na řadě faktorů). Detekovatelnost závisí též na úrovni rušivého pozadí

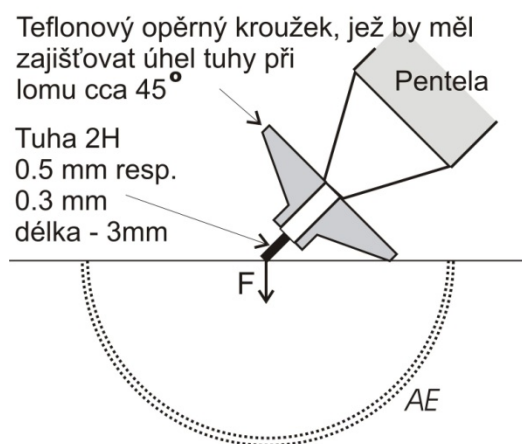
- Práh pokrytí rušení v praxi - od 26dB do 56 dB
- požadovaná citlivost měření -12dB až -20dB (čtvrtina až desetina Pen Testu). I v praxi je však reálné dosáhnout i -40dB (detekce zdroje setiny Pen testu). (v laboratoři lze dosáhnout až -80dB, detekce zdroje destičiciny intenzity Pen Testu)

Orientačně lze konstatovat, že detekovatelnost zdrojů AE průmyslových podmínkách detekce zdrojů AE ze vzdálenosti metrů je o **30dB (30 krát) až 60dB (1000x krát)** nižší než v optimálních laboratorních podmínkách



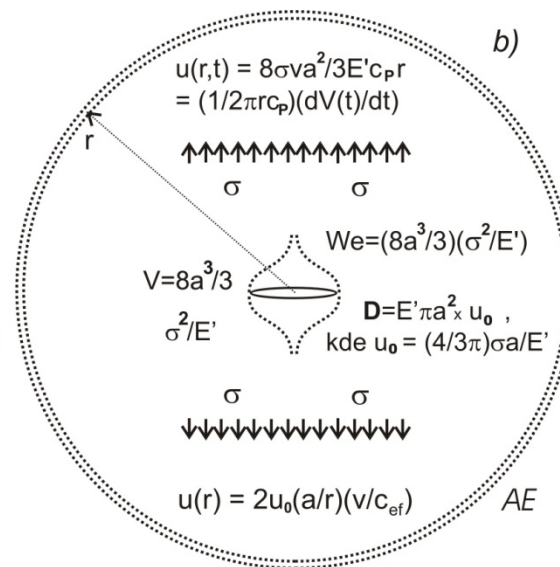
Akustická emise – Detekovatelnost

Porovnání intenzity Pen Testu a „poskoku“ defektu (vzniku izolované trhliny)



Při lomu tuhy dojde ke skokovému odlehčení síly F a vyzáření půlkulové resp. na povrchu kruhové vlnoplochy AE.

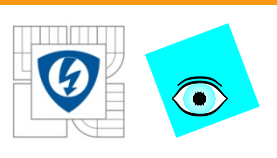
a)
Porovnáním velikostí posuvů ve vlnoploše od Pen Testu a mikrotrhliny lze získat orientační vztah mezi jejich intenzitou



Energetická bilance zdroje AE:

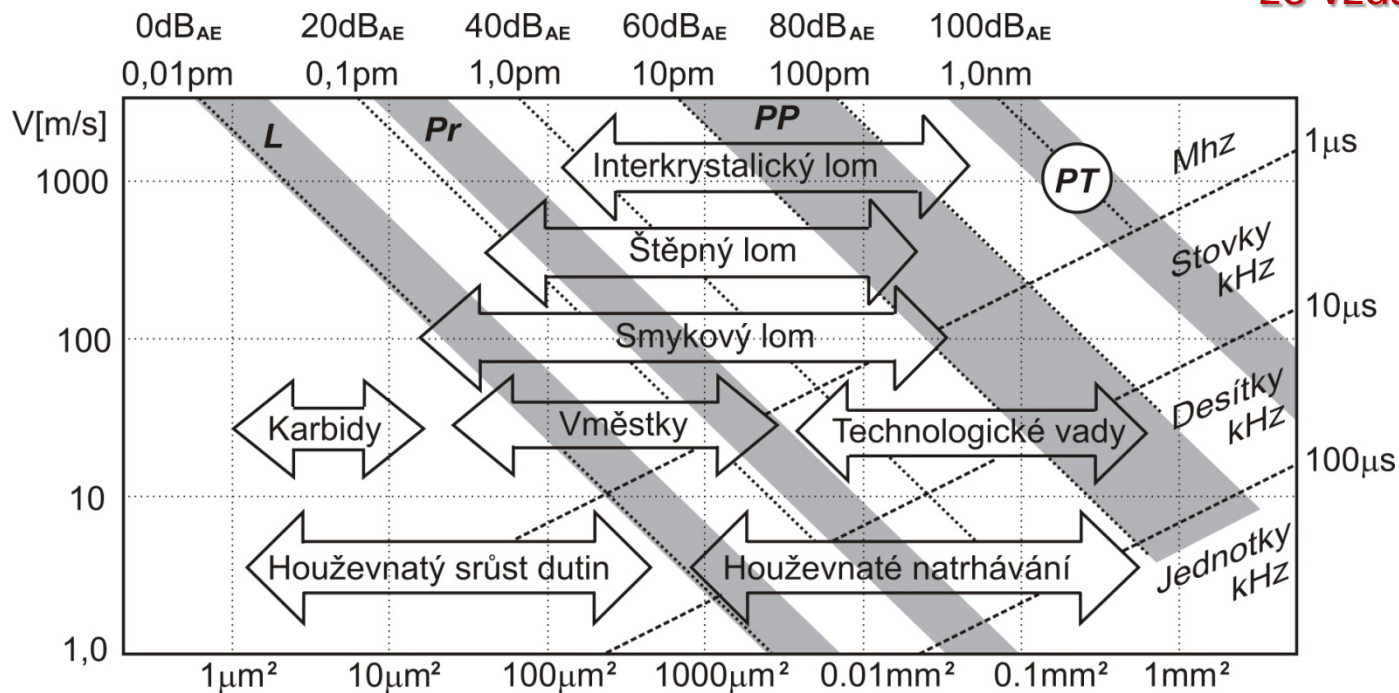
$$W_e = W_d + W_{ae} \text{ kde } W_{ae} = W_e (v/c_{ef})^2 \text{ resp. } (v/c_{ef})^2 = 1 - W_d/W_e$$

Tato jednoduchá obecná energetická bilance nám říká, že pokud je disipovaná energie nízká (u křehkých mechanismů), defekt nabývá vysokou rychlost až c_{ef} a významná část uvolněné energie se vyzáří ve formě AE. Pokud je však podíl disipované energie W_d vysoký (houževnatost, plasticita), pak se trhлина rozvíjí pomalu a podíl AE z uvolněné energie je nízký až prakticky nulový.



Akustická emise – Detekovatelnost

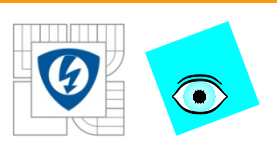
Schéma detekovatelnosti zdroje vzniku izolované mikrotrhliny v oceli
ze vzdálenosti $r=0.05\text{m}$
v tahovém
poli $\sigma=500\text{MPa}$



Vznik izolované křehké trhliny detekovatelné v praxi – rozměr cca desetina mm

Vznik izolované smykové trhliny, dekoheze či lom technologické vady
detekovatelné v praxi – rozměr cca desetiný mm

Vznik izolované houževnaté „mikrotrhliny“ – mm a jednotky mm (a nadto pouze na nízkých frekvencích)

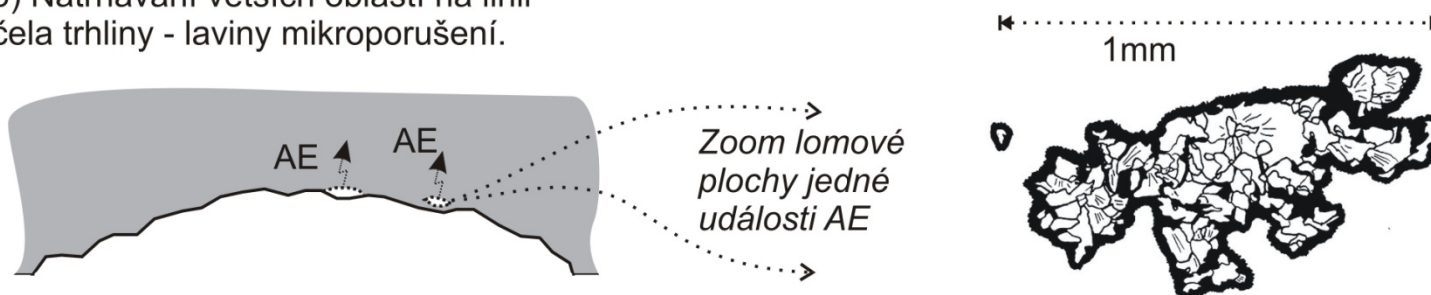


Akustická emise – Detekovatelnost

a) Rozdíl mezi “poskokem” porušení Δ na čele trhliny a při iniciaci izolované mikrotrhliny velikosti Δ .

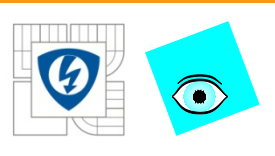


b) Natrhávání větších oblastí na linii čela trhliny - laviny mikroporušení.



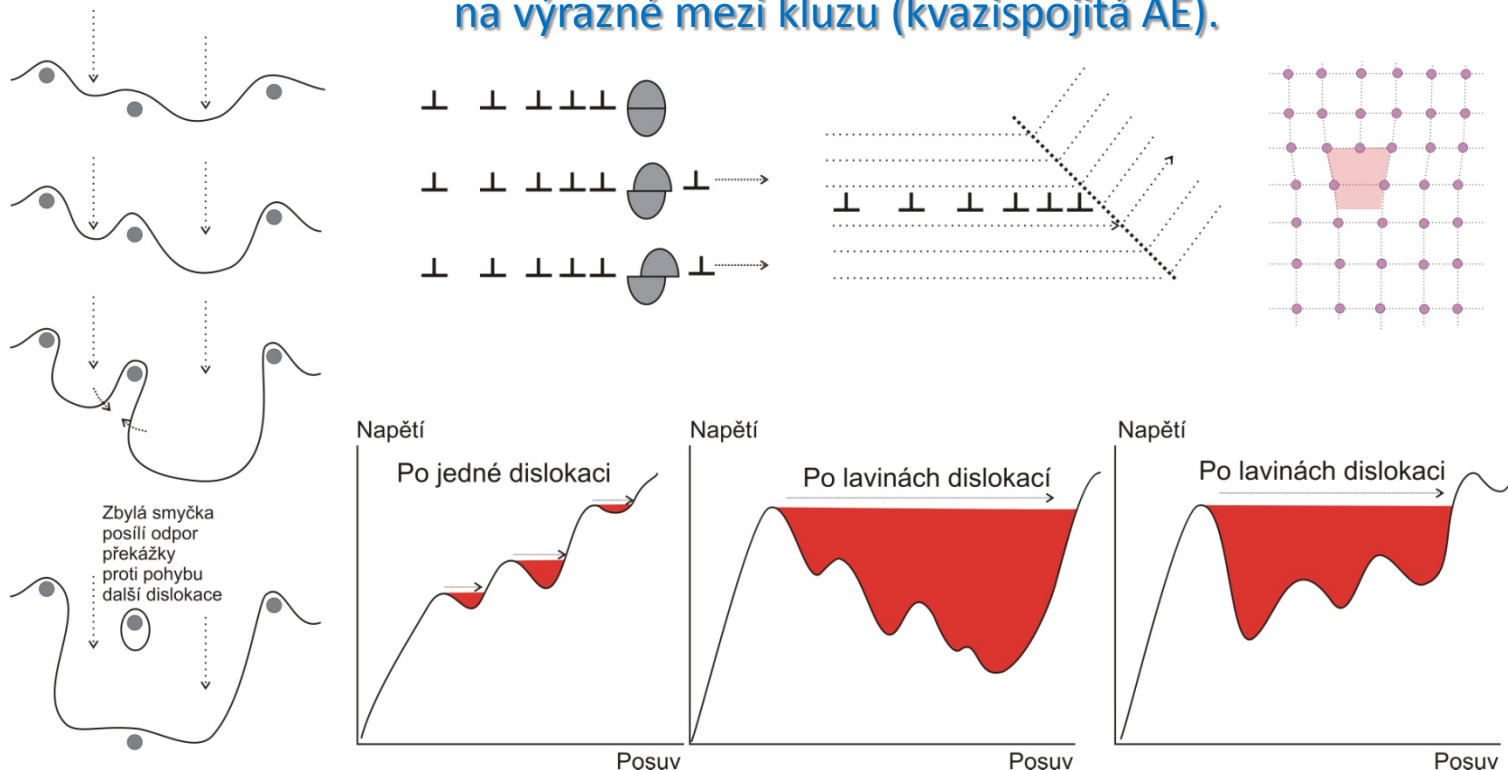
$$u(r,t) = 1/2\pi r c_{ef} (dV(t)/dt)$$

Zesilovací faktor trhliny (100x až 100x) – 20 až 40dB

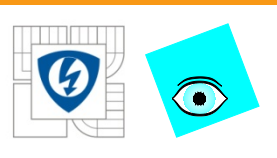


Akustická emise – Detekovatelnost

AE při plastické deformaci ocelí : vyžaduje „utržení“ rozsáhlých lavin dislokací na výrazné mezi kluzu (kvazispojité AE).

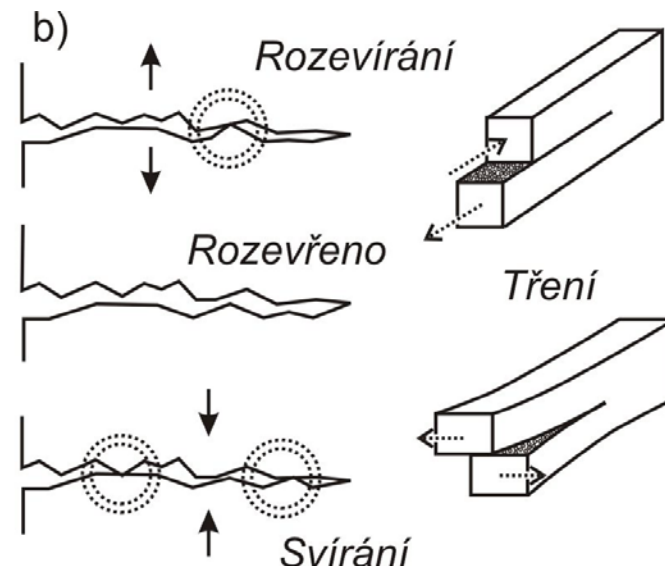
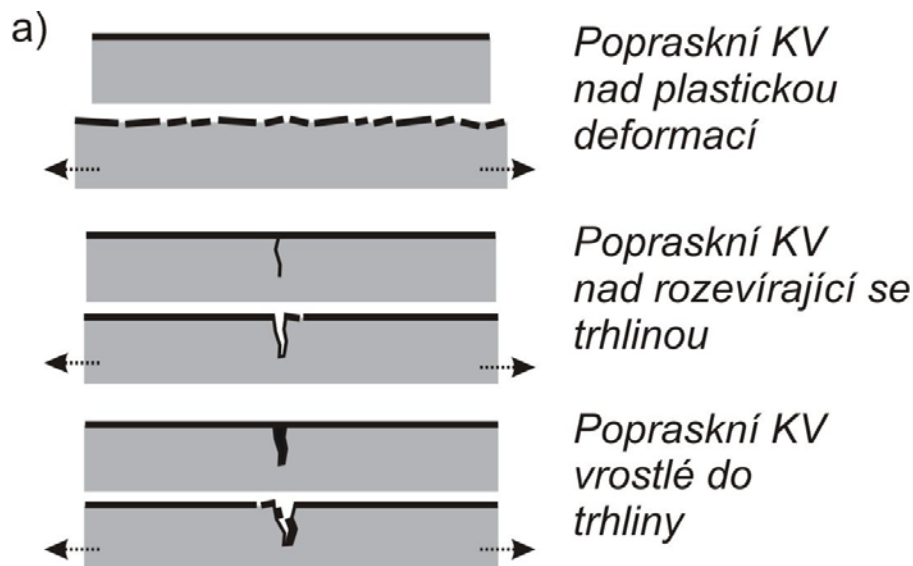


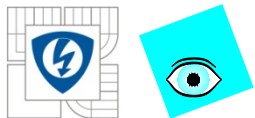
AE při plastické deformaci ocelí : lom resp. dekoheze nekovových složek materiálů (vměstky, aktivní vycezeniny, dle morfologie porušování cementitu v perlitu, ...
- resp. lom či dekoheze korozní vrstvy na povrchu konstrukce.



Akustická emise – Detekovatelnost

Zdroje AE doprovázející plastickou deformaci resp. porušení ocelových konstrukcí jsou z jednoho pohledu zdroje rušivé (sekundární) ovšem mohou být i zdroji cílovými (primárními), jež odhalí významnou plastickou deformaci, koncentrátoři napětí či přítomnost trhlin v konstrukci

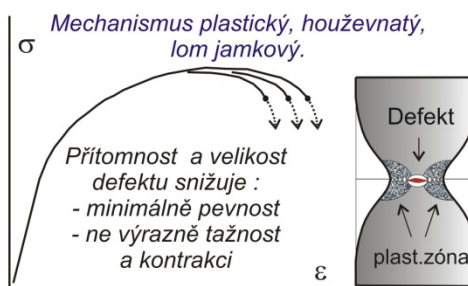




Akustická emise – Detekovatelnost

A: Plastický materiál s dostatečným zpevněním.

Plastická deformace se schopností zpevnění působí jako zpětná vazba v místě vysokého zatížení. Je schopná relaxovat lokální špičky napětí vázané na koncentratory napětí, čelo defektů/trhlin. Koncentraci napětí odrelaxuje, lokalitu zpevní a "obalí" plastickou deformací. Vytvoří uzavírací napětí, otupí čelo ostré trhliny. Koncentrované zatížení rozloží do většího objemu materiálu, do většího efektivního nosného "průřezu". Odstíní/odvede silový tok z lokalit koncentrace zatížení do oblastí méně zatížených.



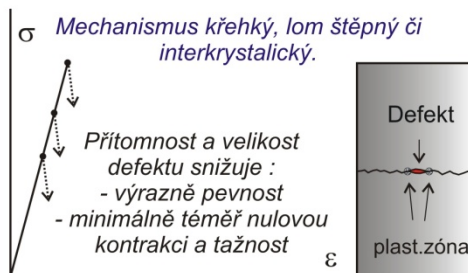
AE může být vázána na dekohezi či lom inkluze (např. MnS). Ovšem před protržením můstku mezi dutinami dojde k relaxaci energie napjatosti plastickou deformací. Protržení nadto probíhá "pomalu". To vede k tomu, že při protržení můstku v houževnatém materiálu je intenzita

AE nízká a detekovatelnost je vázána na protržení pouze velkých můstků.



B: Zvýšení meze kluzu - zkřehnutí.

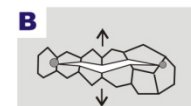
Zvýšení meze kluzu zvyšuje a zaostřuje lokální špičky tahových napětí. Silové působení je "tvrdé", nerelaxuje a hrozí iniciací křehkého porušení materiálu. Křehkost je dána vlastnostmi materiálu (poměrem napětí štěpného a napětí meze kluzu) ale též stavem napjatosti. Vysoká úroveň víceosé tahové napjatosti vede jak ke snížení smykového napětí nutného pro plastickou deformaci a tím k nárůstu napětí tahového, tak k výraznému snížení plastické tažnosti do rozvoje porušení materiálu (viz.7).



AE iniciovaná vznikem štěpné či interkrystalické mikrotrhliny mechanismem je zdrojem AE s velkým podílem uvolněné energie ve formě AE. Je to díky koncentraci plasticitou nerelaxované napjatosti. Nadto k uvolnění dochází rychlým prasknutím.

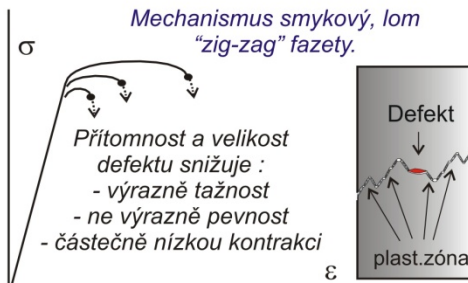
V ocelích vzniká často jedna mikrotrhlina tvořená řadou fazet

- intenzivní prasknutí.



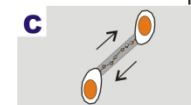
C: Plastický materiál s nízkým zpevněním.

Omezení zpevnění sice plasticitu neomezuje, ovšem dochází k efektu kladné zpětné vazby. V místě vzniku plastické deformace se plastická deformace koncentruje a nepřechází díky zpevnění do okolní nespastizované oblasti jako je tomu u zpevňujících materiálů A). Oproti zpevňujícímu materiálu, jež plastickou deformaci rozkládá do větší-rozsáhlejší oblasti, dochází v tomto případě naopak k lokalizaci a koncentraci plastické deformace ve směru nejvyšších smykových napětí (typicky pod úhlem 45° k hlavnímu napětí tahovému). Deformace se koncentruje do úzkých pásů a vytváří typický "zig-zag" tvar smykového mechanismu lomu.



Smykový mechanismus protržení můstku je zdrojem intenzivních událostí AE. Za prvé v okamžiku protržení je odrelaxováno plasticitou mnohem méně elastické napjatosti oproti houževnatému materiálu se zpevněním. Za druhé rychlost poskoku je při protržení můstku smykem vyšší oproti

houževnatému protržení můstku mezi jamkami.

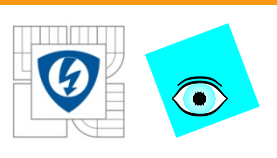


Faktory snižující houževnatost resp.tažnost odezvy na zatížení významně zesilují detekovatelnost AE.

25.5.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Akustická emise – Detekovatelnost

Objasnili jsme si již zásadní vliv rychlosti v poskoku defektu na množství energie vyzářené ve formě AE (W_{AE}). Vliv rychlosti (křehkosti/houževnatosti) mechanismu porušení též vysvětluje obvykle v literatuře uváděné dva sloupce faktorů posilujících/oslabujících intenzitu a aktivitu AE

Faktory posilující intenzitu AE

Trojosá tahová napjatost

Defekt v tlustostěnné konstrukci

Vyšší rychlost zatížení

Nižší teplota zatížení

Vyšší mez kluzu

Nižší zpevnění

Nízká tažnost

Nehomogenita a nečistota materiálu

Faktory oslabující intenzitu AE

Dvouosá rovinná napjatost

Tenkostěnnost konstrukce

Nízká rychlost zatížení

Vyšší teplota zatížení

Nižší mez kluzu

Vyšší zpevnění

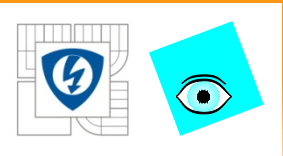
Vysoká tažnost

Homogenita a čistota materiálu

Faktory posilující houževnatost odezvy materiálu na zatížení oslabují AE.

Faktory oslabující houževnatost odezvy materiálu na zatížení, pak posilují AE.

Přitom právě houževnatost, tzn. dostatečná tažnost se schopností zpevnění kovu je základním prvkem pevnostní odolnosti a stability kovových konstrukcí. Jedná se schopnost materiálu k **záporné zpětné vazbě** přerozdělování zatížení z míst ostře lokalizovaných špiček napětí do větší nosné oblasti s rovnoměrným rozložením napětí, do větší a rozsáhlejší nosné oblasti přenášející aplikované napětí ve stěně. Právě díky houževnatosti mají rozumně dimenzované ocelové konstrukce vysokou **pevnostní odolnost i při existenci defektů a koncentrátorů napětí**, které se v technických materiálech prostě vyskytují. Naopak pevnostní problémy byt' lokální jsou vázány na potlačení houževnatosti, ať již snížením zpevnění či tažnosti, resp. zvýšením křehkosti.

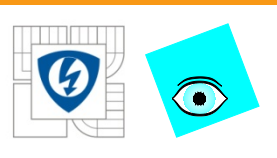


AKUSTICKÁ EMISE – MĚŘICÍ METODA

25.5.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

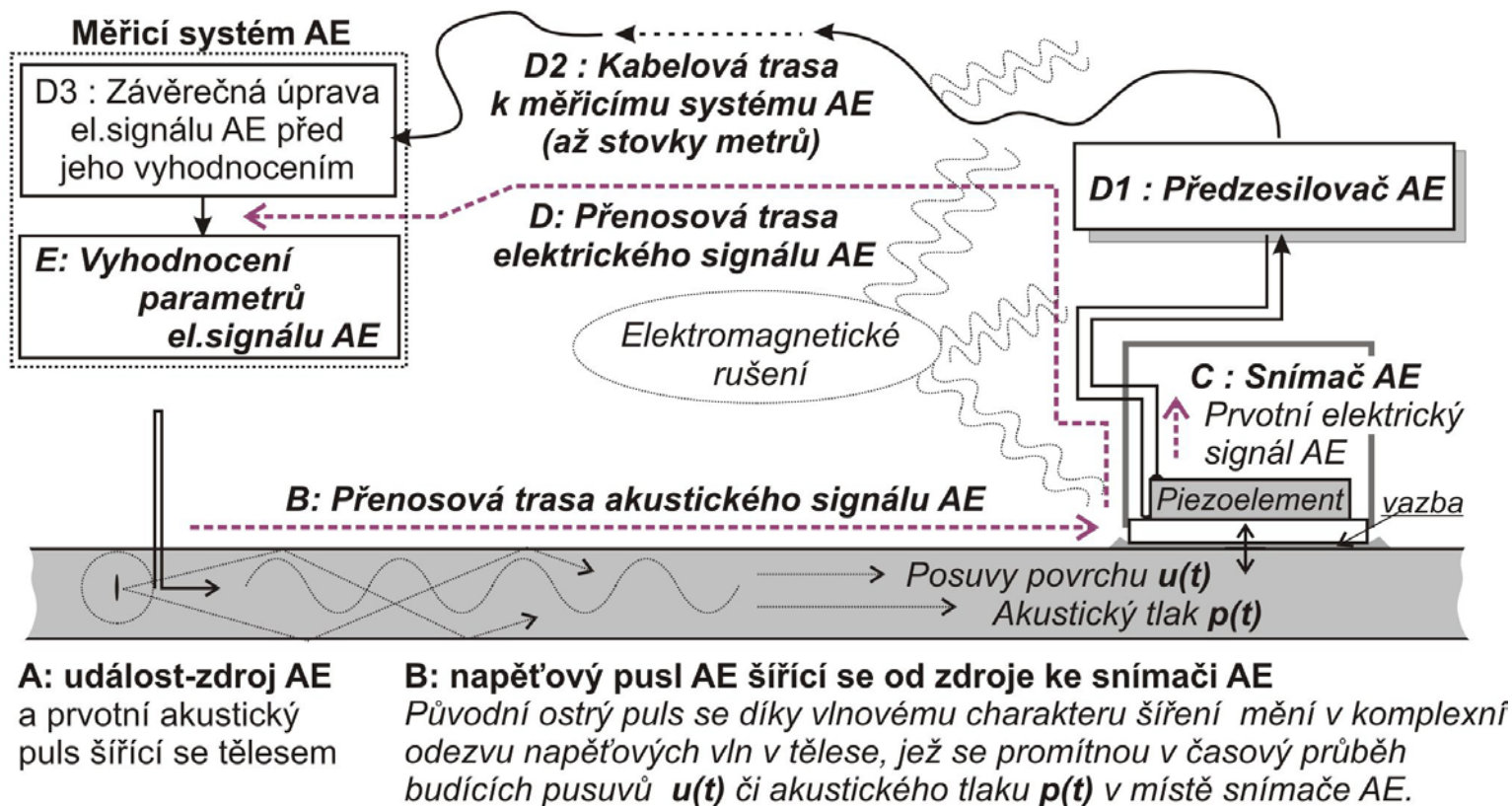


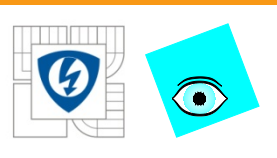


Akustická emise – měřicí metoda

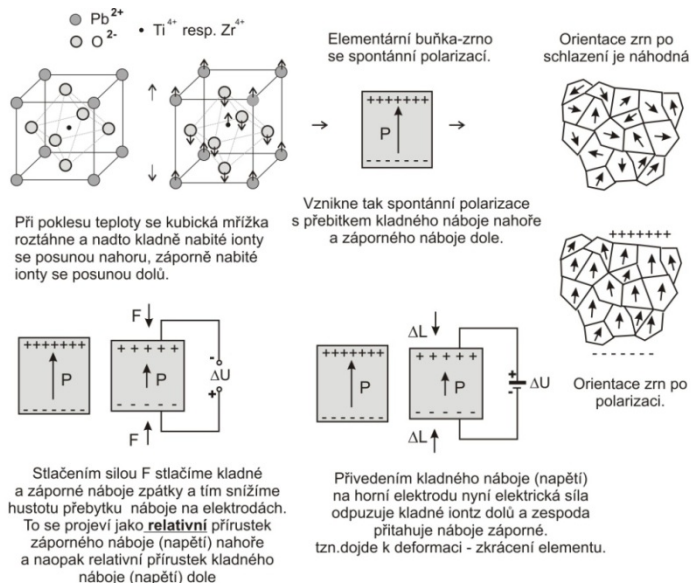
Meřicí trasa elektrického signálu AE

- D1)** Předzesilovač - prvotní zesílení, frekvenční filtrace a impedanční přizpůsobení elektrického signálu ze snímače (v blízkosti snímače - předzesilovač může být též přímo součástí snímače AE - tzn. snímač s integrovaným předzesilovačem)
- D2)** Následný přenos el. signálu kabelem (kabelovou trasou) do měřicího systému AE
- D3)** Závěrečné zpracování a úprava el. signálu AE v měřicím systému před vyhodnocením.





Akustická emise – měřicí metoda



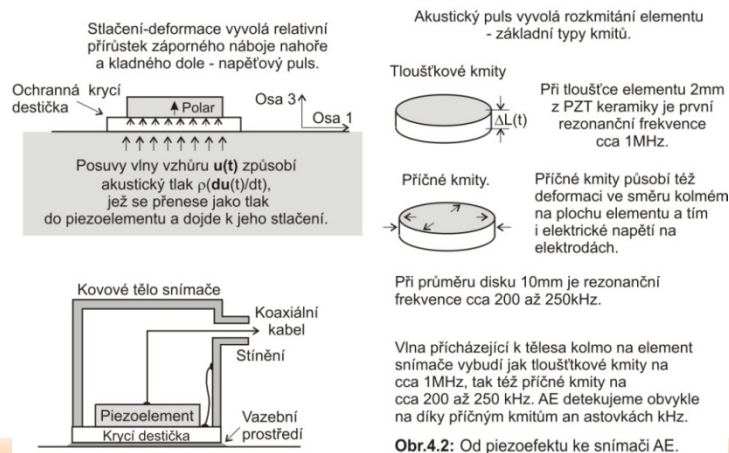
$$U=Q/C \text{ kde } C=\epsilon S/L \text{ resp } U=QL/\epsilon S$$

Existuje řada koeficientů, jež definují piezoelektrické vlastnosti materiálu.

$g=(\Delta U/\Delta p)/L$ - piezoelektrická tlaková konstanta určuje přírůstek napětí ΔU na elektrodách piezoelementu v důsledku stlačení tlakem Δp při výšce elementu L

$d=(\Delta L/L)/\Delta E = \Delta L/\Delta U$ - určuje deformaci $\Delta L/L$ způsobenou přiložením elektrického pole intenzity ΔE resp. elektrického napětí $\Delta U=L\Delta E$.

$h=\Delta E/(\Delta L/L) = \Delta U/\Delta L$ - piezoelektrická deformační konstanta určuje přírůstek napětí ΔU na elektrodách piezoelementu v důsledku deformace $\Delta L/L$



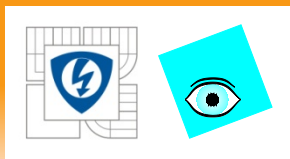
$$g=20 \times 10^{-3} [Vm/N] \text{ resp. } [(mV/mm)/Pa];$$

$$d=500 \times 10^{-12} [m/V];$$

$$h=1.2 \times 10^9 [V/m]$$

natažení o ΔL cca 1pm vyvolá změnu napětí ΔU cca 1mV.
Při citlivosti detekce na cca 10 μV je citlivost detekce posuvů cca $10^{-14} m$.

25.5.2012



Akustická emise – měřicí metoda

Předzesilovač AE

Po detekci elektrického signálu AE na elektrodách piezoelementu snímače je nutno tento signál přenést na vstup měřicího systému AE, a to s dostatečnou citlivostí a pokud možno bez zkreslení deformace průběhu detekovaného signálu. V praxi může dosahovat délka přenosu signálu od snímače k měřicímu systému až stovky metrů. Signál na elektrodách piezoelementu je slabý jak co do napětí, tak co do indukovaného náboje na elektrodách. Proto je nutno v blízkosti snímače instalovat předzesilovač, jež by :

- 1) **primární signál ze snímače zesílil (20dB až 40dB)**
- 2) **provedl základní frekvenční filtraci**
- 3) **přizpůsobil signál impedančně kabelu, který následně převede signál k měřicímu systému**
- 4) **předzesilovač může též plnit vybrané diagnostické funkce**

v rámci diagnostiky snímače resp. celé měřicí trasy od snímače po systém AE

Předzesilovač může být

- přímo zabudován ve snímači (**snímač s integrovaným předzesilovačem**)
- instalován v blízkosti snímače, na jedno až třímetrovém kabelu před předzesilovačem

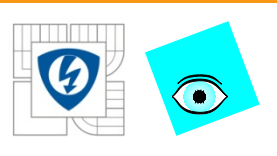
Základní parametry předzesilovačů AE jsou

zesílení, napájení, citlivost a dynamický rozsah předzesilovače (70 až 90dB)

Horní limit rozsahu přenášeného signálu AE je dán

napájecím napětím / zesílením předzesilovače (92 až 120 dB vers μV).

Dolní limit rozsahu určuje elektrickou citlivost měření (14 až 34dB vers μV).



Akustická emise – měřicí metoda Kabelové trasy.

Kabel by měl signál přenést elektrický signál AE z předzesilovače do systému AE (na vzdálenost až desítek až stovek metrů) pokud možno

bez ztrát (útlumu) bez deformací časového a frekvenčního tvaru signálu

bez indukovaného elektromagnetického rušení na kabelové trase

(první dvě podmínky obvykle ,splňují do desítek m spolehlivě problémy se začínají objevovat u vyšších frekvencí při stovkách metrů).

Existuje několik základních typů kabelů, jež jsou používány pro kabelové trasy měření AE.

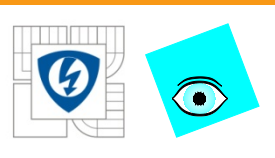
-**Koaxiální kabely**, jež jsou používány nejčastěji. Jistou nevýhodou je, že jedno ze signálních vedení je vedeno též po stínění-zemnění systému (viz.dále kapitola 4.6)

-**Společně stíněný kroucený pár** je méně časté řešení, kde vlastní signál vede kroucený pár oddělený od vnějšího stínění-zemnění, ale toto řešení vykazuje vyšší citlivost k rušení než kabel koaxiální.

Pro vyšší eliminaci rušení indukovaného na kabelových trasách v průmyslu lze použít:

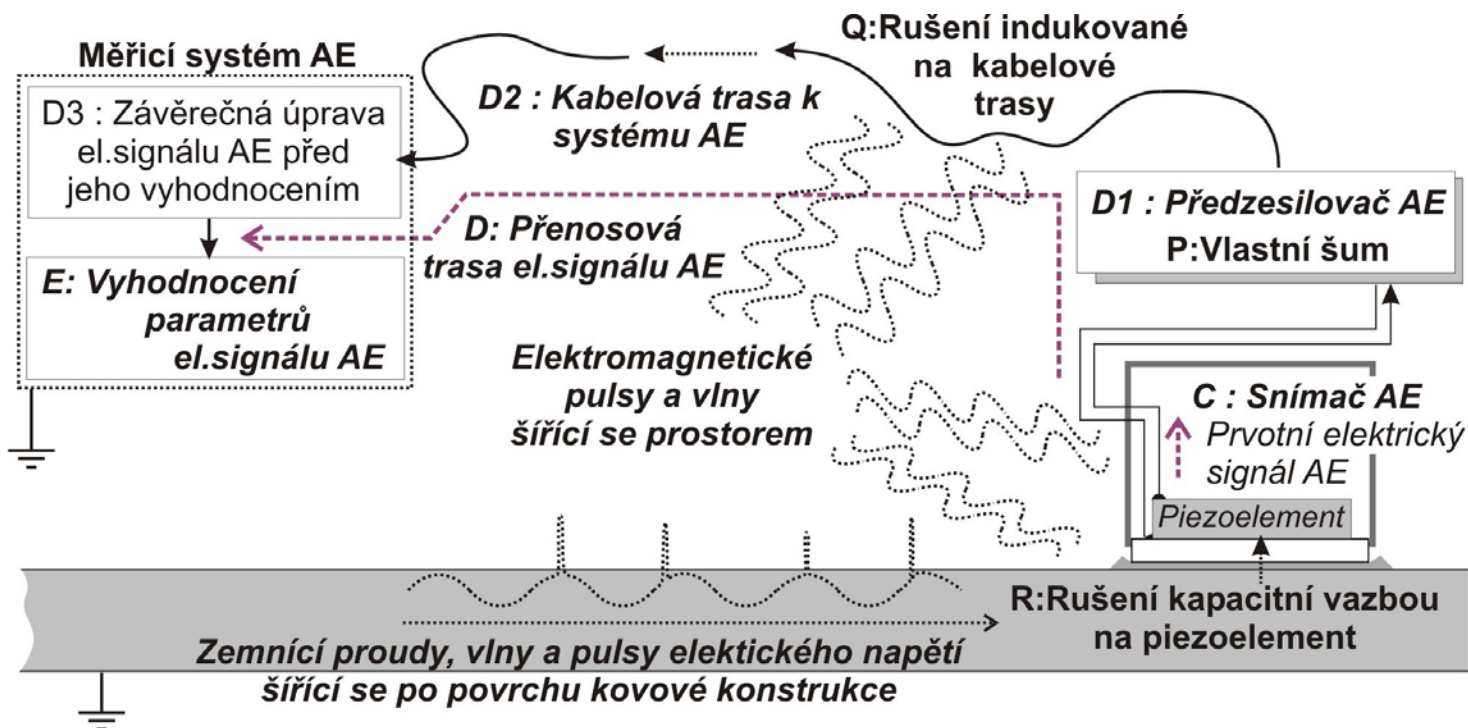
-**Triaxiální kabely**, kde je stínění-zemnění vedeno vně vnitřního koaxiálního kabelu vedoucího vlastní signál (díky vyšší odolnosti vůči rušení bývá triaxiální kabel využíván též pro vedení 4 signálu ze snímače do předzesilovače)

-**Dva kroucené páry společně stíněné** používáme pro stíněný diferenciální přenos signálu. Tento přenos je při dobře řešeném diferenciálním přenosu výrazně odolnější oproti samostatnému kroucenému páru i koaxiálnímu kabelu.



Akustická emise – měřicí metoda

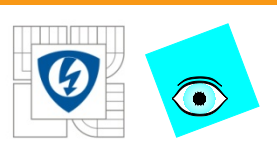
Elektromagnetické rušení a jeho eliminace



P: Vlastní šum předzesilovače bývá jednotky až desítky μV . Nejedná se o rušení ve vlastním slova smyslu.

Q: Rušení indukované na kabelové trase mezi předzesilovačem a měřicím.

R: Rušení indukované kapacitní vazbou na piezoelement je rušení **nejzávažnější**, protože se indukuje přímo na elektrody piezoelementu, rozkmitává piezoelement



Akustická emise – měřicí metoda

Meřicí systém AE provádí **závěrečné přizpůsobení signálu v systému AE před jeho vyhodnocením a jeho vyhodnocení.**

- a) *Dorovnání signálu na stejnou úroveň vůči kalibraci měřicí trasy.*
- b) *Přizpůsobení signálu vstupnímu rozsahu vyhodnocovací jednotky.*
- c) *Závěrečná frekvenční filtrace signálu před vyhodnocením.*

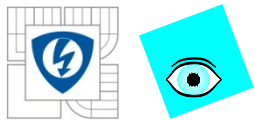
Vyhodnocení signálu a zobrazení výsledných dat AE.

Počet kanálů	Úroveň vyhodnocení signálu.		
	<i>Informativní</i>	<i>Standardní</i>	<i>Pokročilá</i>
1 až 4	1A	1B	1C
5 až 20	2A	2B	2C
mnoho	3A	3B	3C

Informativní úroveň znamená, že nás zajímá především a pouze vlastní přítomnost AE, začátek či konec aktivity resp. základní trendy (růst či pokles) aktivity a intenzity a to vzhledem k době výskytu AE či k externím faktorům, parametrům.

Standardní úroveň znamená, že vyhodnocujeme základní, obvykle vyhodnocované parametry elektrického signálu AE především V časové reprezentaci, vyhodnocení “obálkových” parametrů bez vyhodnocení detailní struktury plně digitalizovaného signálu AE.

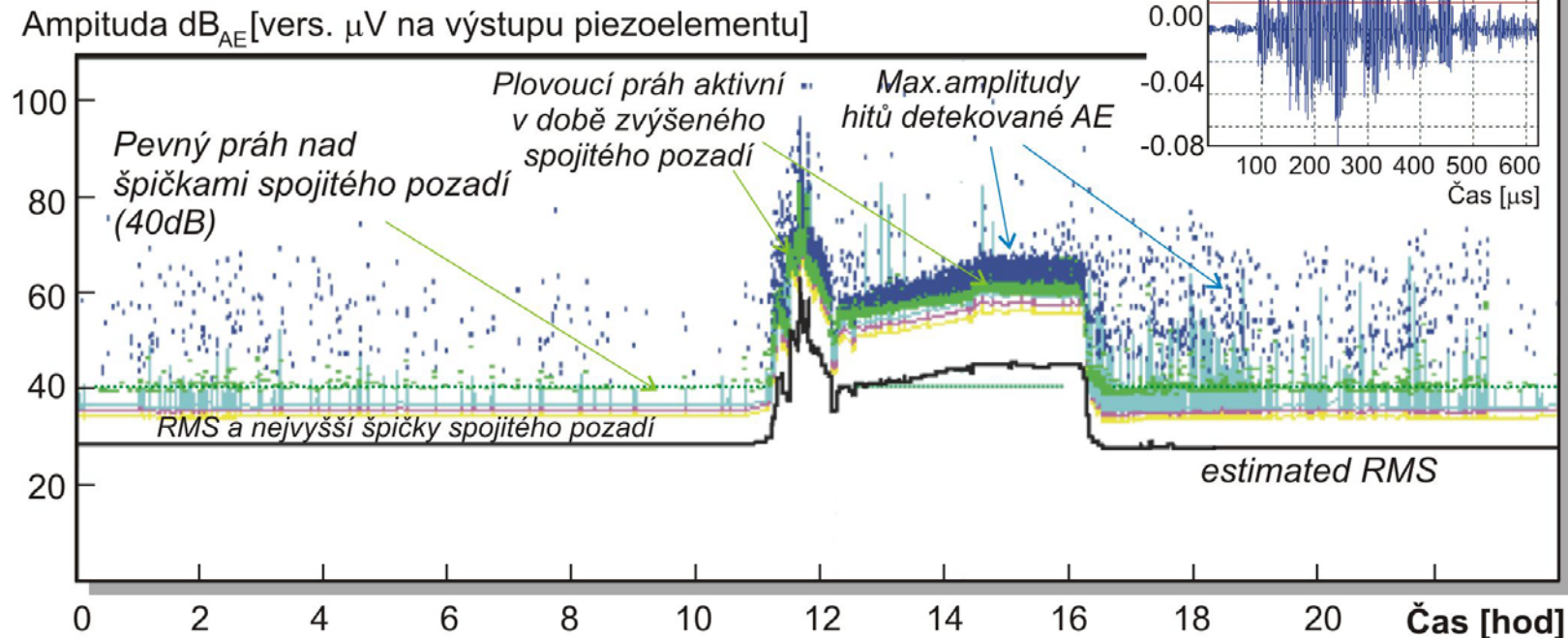
Pokročilé vyhodnocení signálu je vyhodnocení na nejvyšší úrovni a do nedávna představovalo zájem především výzkumně vědeckých institucí. Nicméně v posledních letech se začíná detailní vyhodnocení průběhu digitalizovaného signálu uplatňovat i ve vybraných aplikacích v praxi. V praxi je však žádoucí zvážit, zda přínos plné digitalizace s "Advanced Signál Processingem" odpovídá rozumně stanoveným aplikačním cílům daného nasazení AE.



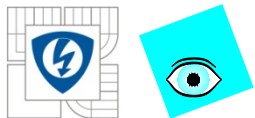
Akustická emise – měřicí metoda

Jednodenní záznam aktivity AE jednoho měřicího kanálu AE v průběhu provozního monitorování potrubí s nárůstem pozadí v důsledku technologických operací.

Příklad hitu signálu AE detekovaného na měřicím kanálu

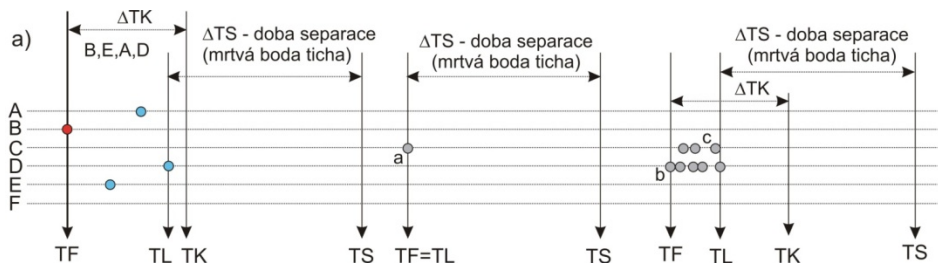


- a) **Práh pevný** je práh, jež se v průběhu měření nemění resp. nemění se jinak než skokovým přenastavením pevného prahu na novou úroveň opět pevného prahu.
- b) **Práh plovoucí** je práh "plující" (pomalu se měnící) s jistým odstupem nad úrovní pozadí např. nad úrovní RMS resp. nad úrovní nejvyšších špiček obálky signálu pozadí



Akustická emise – měřicí metoda

Kompletace hitů do událostí AE a určení Δt příchodů představuje úlohu seskupení několika hitů, jež vyhodnotíme jako odezvy téže budící události AE v různých měřicích kanálech sítě. O této skupině hitů hovoříme následně též jako o události AE (tato skupina hitů je odrazem události AE).

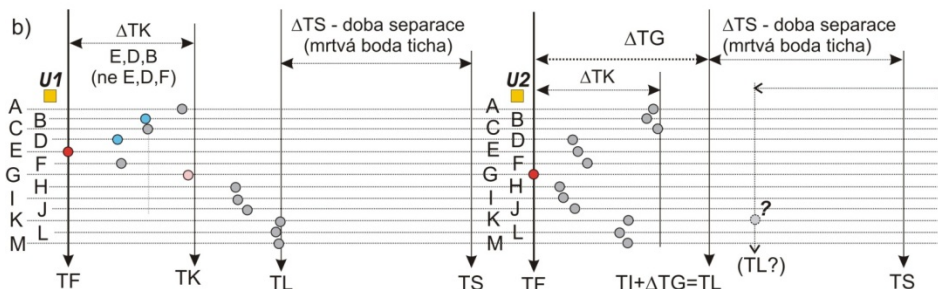


Doba kompletace událostí ΔTK ;
Doba separace událostí ΔTS ;
Minimální počet příchodů MPR

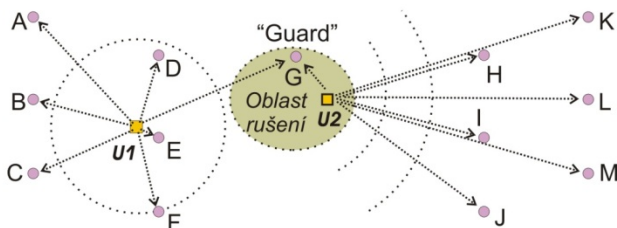
NPR – počet příchodů (hitů), jež tvoří sekvenci (pořadí) příchodů v době kompletace ΔTK

Sekvence – pořadí příchodů hitů události AE

$\Delta t_1, \Delta t_2, \dots$ – zpoždění detekce hitů v pořadí příchodů

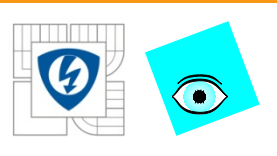


U2 - Snímač Guard
U1 - Povolené sekvence

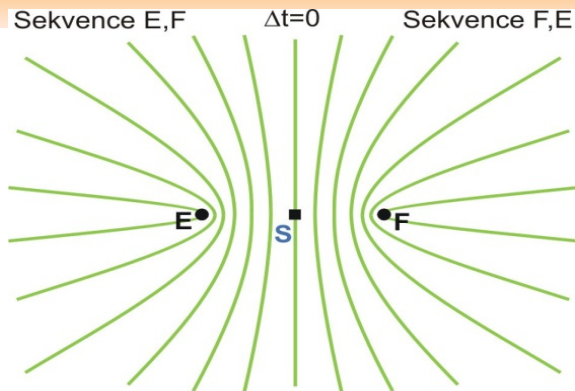


V principu existují dvě základní realizace kompletace hitů do událostí AE:

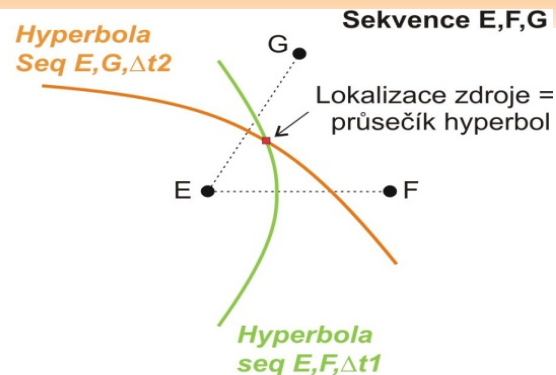
Hardwarová versus **Softwarová** kompletace událostí AE.



Akustická emise – měřicí metoda



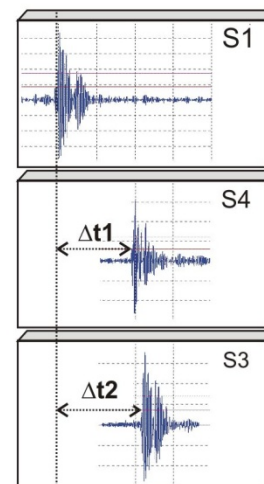
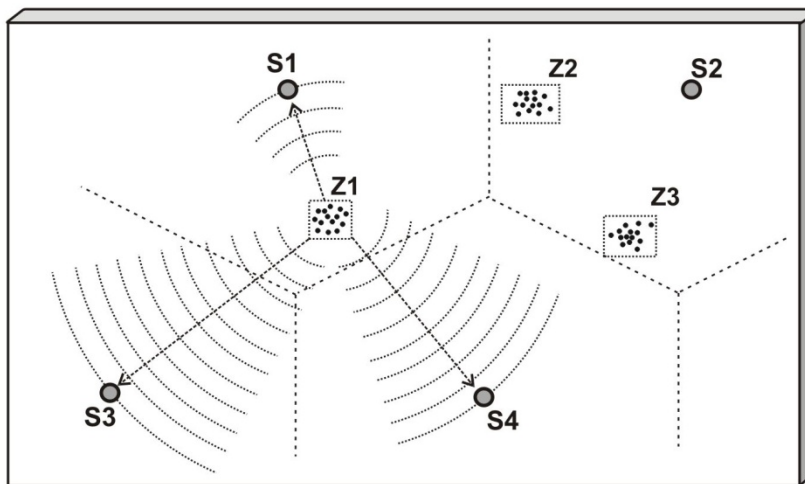
a) S růstem Δt od 0 přechází hyperboly od přímky osy symetrie E,F ($\Delta t=0$) ve stále uzavřenější hyperboly, až pro $\Delta t=EF/c$ se uzavírání hyperboly uzavře, hyperbolu již nelze vytvořit a tím nelze ani lokalizovat.

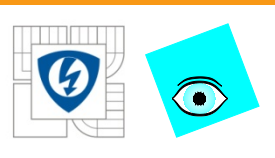


b) Známe-li díky dvěma Δt dvě hyperboly jednu odpovídající sekvenci E,F (Δt_1) a druhou odpovídající sekvenci E,G (Δt_2) pak výsledkem roviné lokalizace je průsečík těchto dvou hyperbol.

Princip rovinné planární lokalizace.

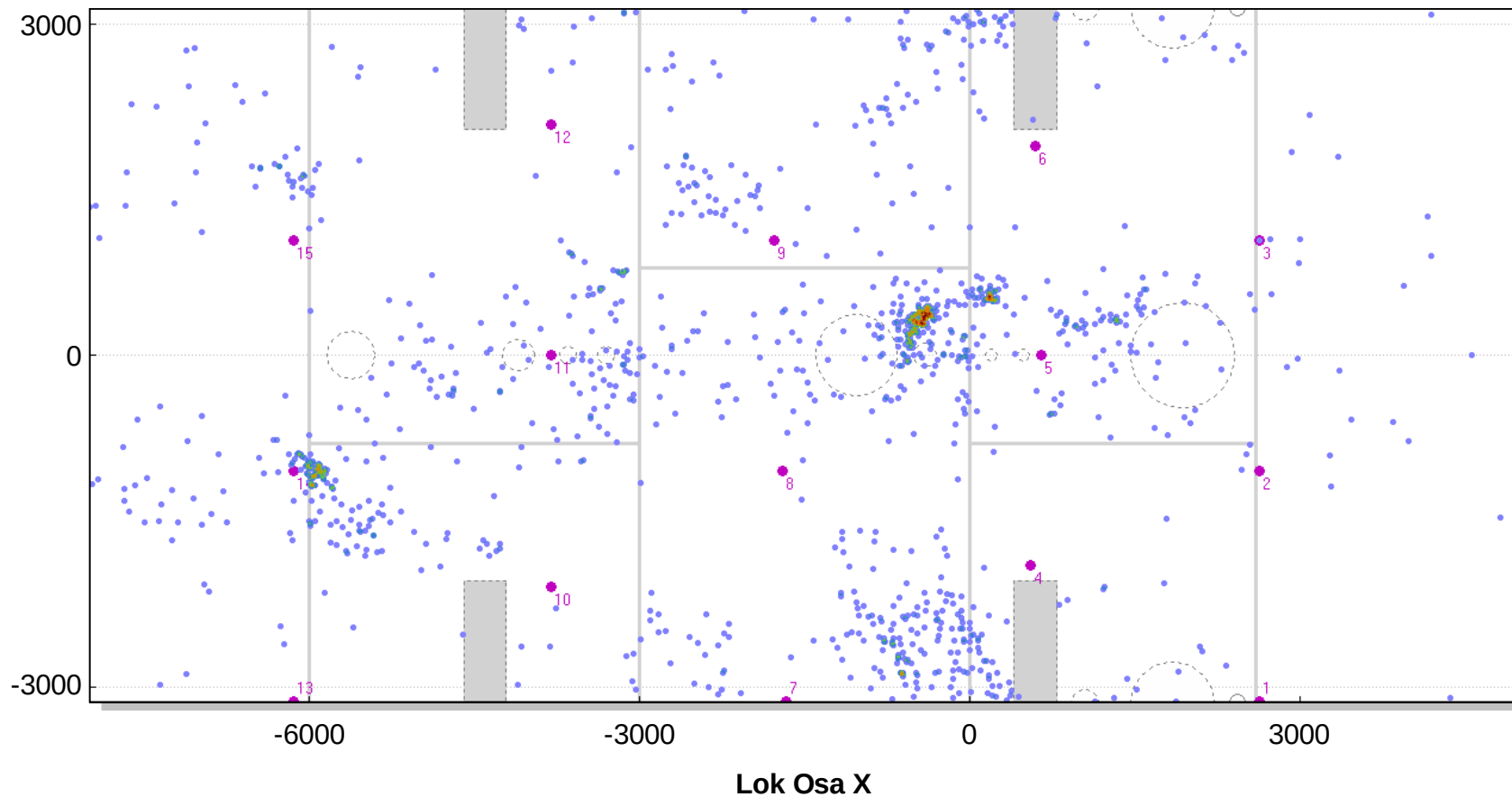
Hyperbola jako geometrické místo bodů se stejným zpožděním příchodů do dvou snímačů.





Akustická emise – měřicí metoda

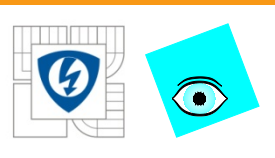
Lok Osa Y



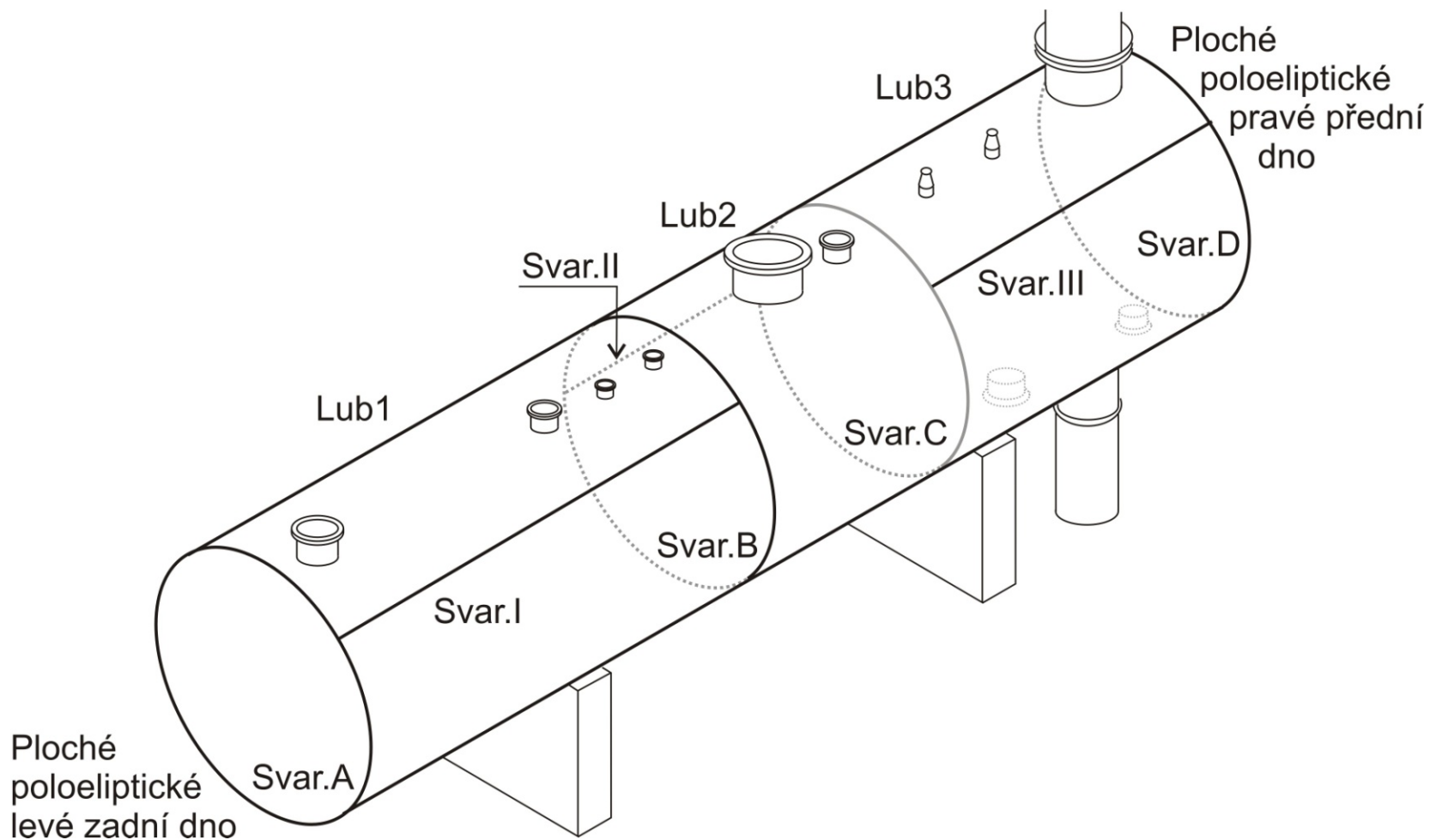
25.5.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





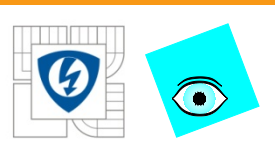
Akustická emise – měřicí metoda



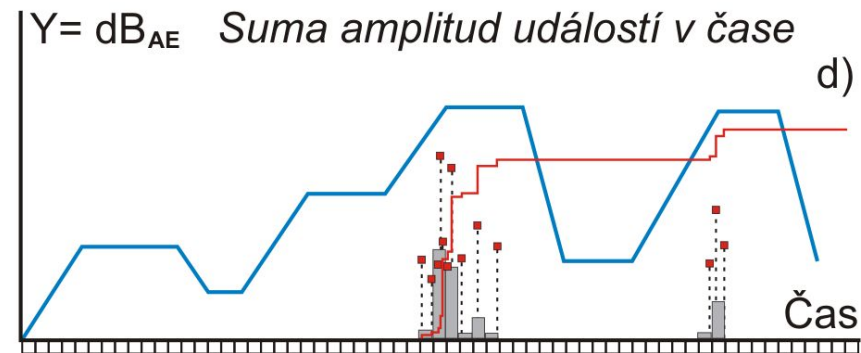
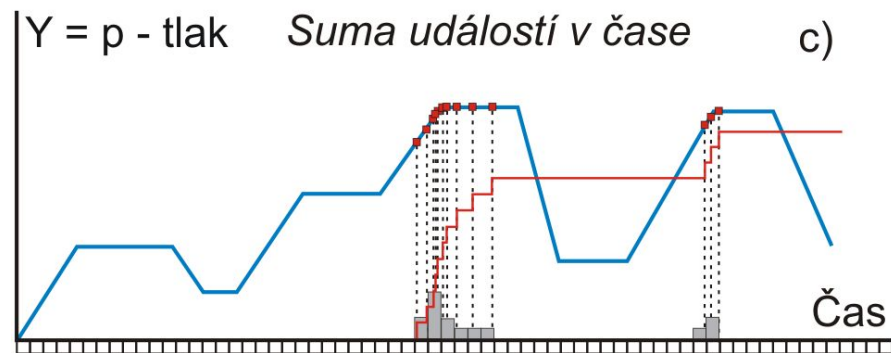
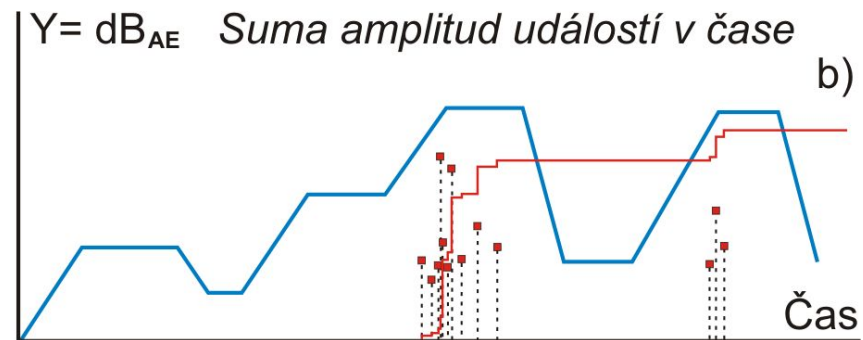
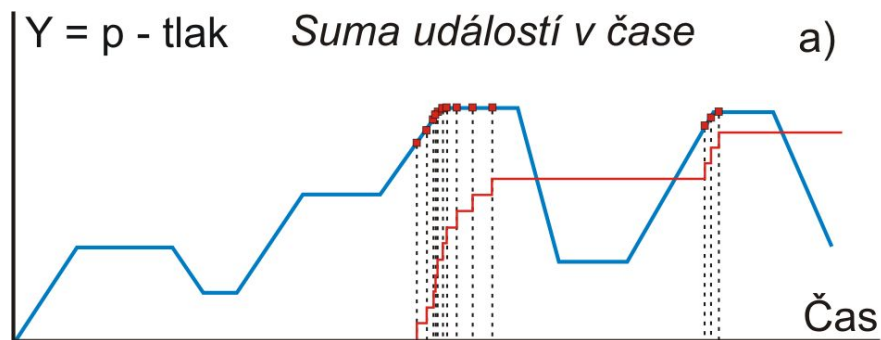
25.5.2012

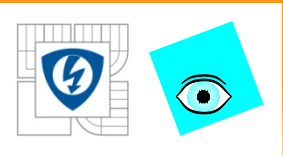
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Akustická emise – měřicí metoda



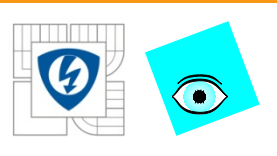


AKUSTICKÁ EMISE – NDT KONSTRUKCÍ

25.5.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Akustická emise – NDT konstrukcí

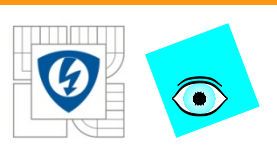
Aplikační využití metody AE pro NDE kovových konstrukcí datujeme do 60-tých let do USA a bylo vázáno především na uplatnění AE v rámci tlakových zkoušek. (V ČR První systém AE (Trodyne), pokud vím, koupila na počátku 70-tých let Škoda Jaderné strojírenství.

Schopnost metody AE detekovat a lokalizovat defekty řadí metodu AE mezi NDT (defektoskopické metody). Nicméně metoda AE se svým principem a nasazení od typických NDT metod významně liší. Typické nasazení AE při NDT kontrolách ocelových konstrukcí jsou :

Za první ve fázi (0) tzn. při povýrobní či předprovozní tlakové či zatěžovací zkoušce resp. při monitorování AE při prvním náběhu a v prvních fázích provozu konstrukce.

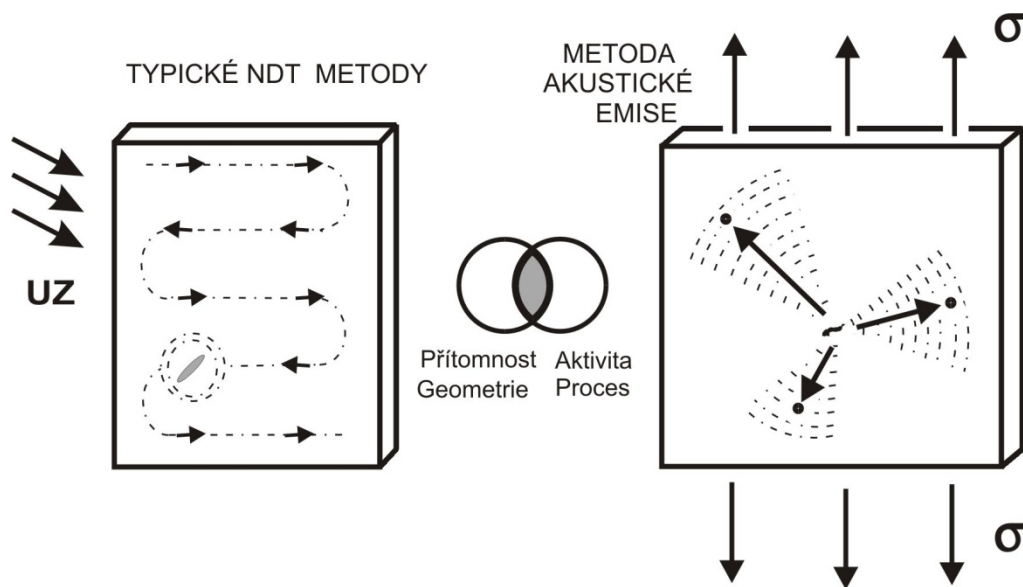
Za druhé ve fázi (4) tzn. při tlakových zkouškách po X letech provozu resp. jako systém monitorování úniků v rámci přístupu LBB (Leak Before Break).

Za třetí On-line monitorování AE za provozu pro detekci rozvoje případného závažného porušení ve fázi (3) až (4) (Detection of Crack Before Leak or Failure).



Akustická emise – NDT konstrukcí

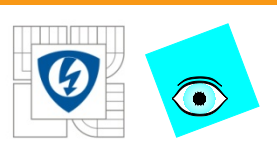
Metoda AE a typické NDT metody se svým principem nepřekrývají ale naopak vhodně doplňují jsou komplementární.



Metoda AE detekuje rozvoj procesu.

Pracuje s cílem „odposlechu“
Akustické aktivity emitované procesy
Probíhajícími v materiálu (plastická deformace, iniciace a rozvoje porušení, Svírání a rozevírání trhlin, únik média přes průchozí trhlinu). Metoda AE detekuje, lokalizuje a hodnotí aktivitu Porušení a defektů
právě a pouze v jejich průběhu.

Typické NDT metody charakterizují stav – výskyt porušení či defektu. Pracují s cílem vhodného „zviditelnění“ přítomnosti defektu. Typické NDT metody vyhledávají přítomnost a charakterizují velikost, resp. orientaci defektů.



Akustická emise – NDT konstrukcí

Konstrukce je monitorována sítí snímačů. To zajišťuje kontrolu celé konstrukce či celé vybrané oblasti současně v rámci jedné zkoušky. AE detekuje aktivitu defektů „na dálku“ (i několika metrů) z celé monitorované oblasti konstrukce osazené sítí snímačů AE. Metoda AE detekuje defekty jak vnější/povrchové, (včetně vnitřního povrchu), tak defekty vnitřní v objemu, detekuje též defekty z nepřístupných míst, či z míst, jejichž zpřístupnění je nákladné.

Metoda AE umožňuje v řadě případů provádět inspekci resp. kontrolu přímo v průběhu provozu konstrukce, bez nutnosti jejího odstavení.

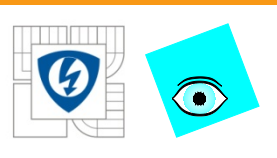
Procesy jsou detekovány právě a pouze v průběhu rozvoje procesů - zdrojů AE. Řada procesů-zdrojů AE je **nevratných**, tzn. pokud v okamžiku rozvoje procesu aktivitu AE nedetekujeme, zkoušku nelze zopakovat, je **neopakovatelná**.

AE monitoruje skutečnou aktivitu defektu v reálných podmínkách zatížení, při skutečné velikosti a orientaci defektu, při skutečně působící úrovni a orientaci napětí, teplotních pnutí, při reálném stavu materiálu a jeho degradace v místě defektu, při působení média... AE detekuje reálnou přítomnost komplexních podmínek rozvoje porušení.

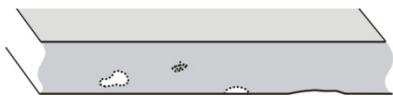
Metoda AE detekuje defekt jen a pouze současně s přítomností podmínek pro rozvoj detekovatelné AE vyvolané přítomností a aktivitou defektu - procesu.

Metoda AE nedetekuje defekty v době zkoušky statické, neaktivní defekty a defekty, jejichž aktivita je „tichá“ či v podmínkách zkoušky nedetekovatelná.

Správné a přínosné nasazení a vyhodnocení výsledků zkoušky AE bývá komplexnější a náročnější úlohou než u typických NDT (pokud se nejedná o rutinní opakovanou zkoušku).



Akustická emise – NDT konstrukcí



1) Nezávažný

3) Závažný

0) Porušení při prvním zatížení, uvedení do provozu či fázi počátečního provozu (ať již pouze na úrovni mikrostruktury, resp. na úrovni stěny, kdy konstrukce není neschopna odolávat podmínkám provozu.)

Fáze stabilního provozu a čerpání životnosti.

Fáze poklesu pevnostní odolnosti stěny s časem v důsledku vyčerpání životnosti, kumulace poškození, degradace materiálu...

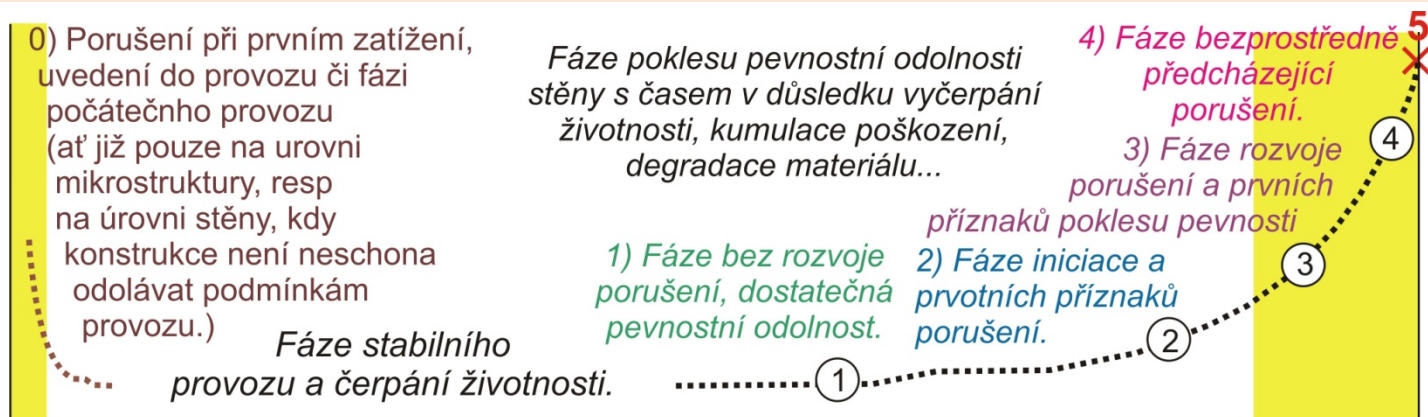
1) Fáze bez rozvoje porušení, dostatečná pevnostní odolnost.

příznaků poklesu pevnosti

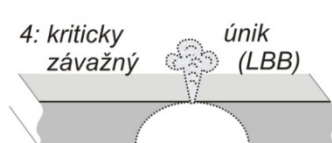
2) Fáze iniciace a prvotních příznaků porušení.

4) Fáze bezprostředně předcházející porušení.

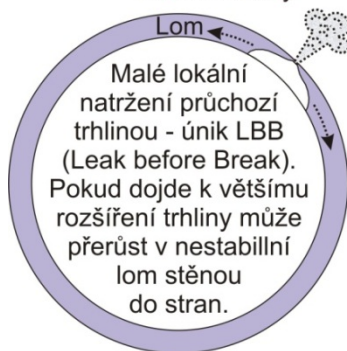
3) Fáze rozvoje porušení a prvotních



„porušení za kontrolovaných podmínek“ (tlaková zkouška) či projektem uvažované porušení (LBB) pokryté havarijními opatřeními ke snížení následků. K pokrytí rizika porušení = $POF \times COF$ (Probability of Failure) $\times$ (Consequence of Failure)



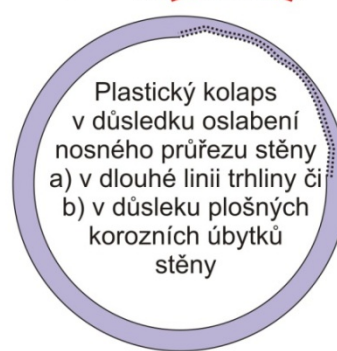
5 Únik přechází do roztržení stěny.



Malé lokální natržení průchozí trhlinou - únik LBB (Leak before Break). Pokud dojde k většímu rozšíření trhliny může přerůst v nestabilní lom stěnou do stran.



5 Plastický kolaps, tvárné roztržení



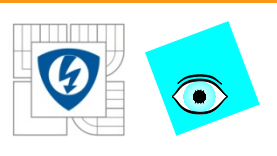
Plastický kolaps v důsledku oslabení nosného průřezu stěny a) v dlouhé linii trhliny či b) v důsledku plošných korozních úbytků stěny



5 Křehký lom, lom netvárný



Křehký lom (netvárný), jež se může iniciovat i z malé trhliny a jež bez většího varování vede k náhlému rozsáhlému roztržení stěny.



Akustická emise – NDT konstrukcí

Výsledek vyhodnocení zkoušky či monitorování AE spočívá obvykle v

V identifikaci zdrojů – tzn. ve výběru a rozdělení naměřené aktivity AE dle shodných/podobných charakteristik na aktivitu AE jednotlivých detekovaných procesů-zdrojů, např. dle času výskytu či místa výskytu v lokalizační mapě (jako shluků událostí AE) resp. dle komplexnějších kritérií pro eliminaci rušivých zdrojů či rušivé aktivity AE.

Ve vyhodnocení každého jednotlivého primárního zdroje nezávisle jeden po druhém a v jejich klasifikaci dle dané stupnice závažnosti, kde každému stupni závažnosti přísluší též jisté **doporučení následných kroků**.

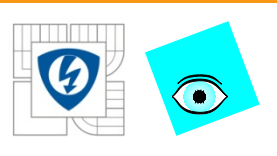
Např: ČSN EN 14584 uvádí následnou třístupňovou klasifikaci zdrojů:

1 – Nevýznamný zdroj = další postup: Žádná činnost není nutná, zdroj se zahrne do protokolu pro porovnání s následnou zkouškou.

2 – Aktivní zdroj = další postup: Pokud zdroje souvisí se specifickými částmi tlakového zařízení **doporučuje se** další NDT (např. svarové spoje, přivařované části)

3 – Kriticky aktivní zdroj = další postup: před uvedením tlakového zařízení do provozu **musí být provedeno** další vyhodnocení pomocí vhodné NDT

Jiné systémy hodnocení mohou užívat jiné i vícestupňové hodnocení AE. Např. MONPAC uvádí 5-ti stupňovou klasifikaci AE (A,B,C,D,E). Dalším příkladem může být klasická klasifikace dvoustupňová „1-Vyhovující“/-„nevyhovující“. Další příklad možné 4-stupňové klasifikace uvádí obrázek jako „**Nezávažný**“, „**Potenciálně závažný**“, „**Závažný**“, „**Kriticky závažný zdroj**“.



Akustická emise – NDT konstrukcí

Přestože konkrétní problematika hodnocení závažnosti zdrojů AE přesahuje určení a rozsah tohoto textu, zdůrazněme významný aspekt, jež by mělo vyhodnocení a klasifikace závažnosti zdrojů AE zahrnovat, a to :

na jedné straně rozumnou míru konzervativnosti, abychom neopominuli či nepodhodnotili skutečně závažný zdroj AE na straně druhé opět rozumnou míru konzervativnosti proto, abychom nevyvolávali zbytečná falešná závažná hlášení

Pro klasifikaci **nižších** stupňů závažnosti proto připouštíme i záměnu za rušivý zdroj. Falešné hlášení je přijatelné, protože následná doporučení nejsou tak akutní, naléhavá a nemají tak závažné dopady doporučených následných kroků.

Pro klasifikaci **vyšších** stupňů závažnosti by měly být příznaky, dle kterých hodnotíme závažnost příznačné (signifikantní) právě a pokud možno jen pro závažné zdroje a pravděpodobnost jejich záměny s příznaky zdrojů Rušivých či méně závažných by měla být co nejnižší.

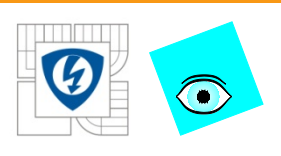
V případě nasazení AE při tlakových zkouškách taková kritéria máme k dispozici, kritéria jež jsou typická pro závažné zdroje a ne typická pro rušivé zdroje, jsou to :

Intenzitní kritérium – detekce událostí AE s intenzitou cca srovnatelnou s Pen Testem či intenzivnější.

Nárůst AE v prodlevách – nárůst doby doznívání a celkové aktivity AE detekované v prodlevách po předchozím nárůstu zatížení.

Felicity jev – narušení Kaiserova jevu v druhém cyklu zatížení.

Progresivita růstu AE – proresivní růst aktivity či intentity AE s rostoucím zatížením.

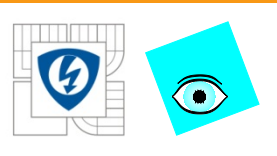


AKUSTICKÁ EMISE – SPOLEHLIVOST

25.5.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Akustická emise – Spolehlivost

Spolehlivost POD detekce závažného porušení metodou AE.

POD - Probability of Detection (pravděpodobnost detekce závažného pevnostního problému) znamená pravděpodobnost, že závažný pevnostní problém detekujeme, **je-li přítomen**. Resp. je-li skutečně přítomen závažný pevnostní problém, s jakou pravděpodobností **POD** jej metoda AE detekuje.

1-POD naopak představuje pravděpodobnost přehlédnutí či podcenění skutečně existujícího závažného porušení či závažného pevnostního problému.

PFA - Probability of False Alarm (pravděpodobnost falešného hlášení závažného stavu), znamená pravděpodobnost, že nahlásíme falešný alarm v případě, kdy v konstrukci porušení či závažný pevnostní problém není přítomen.

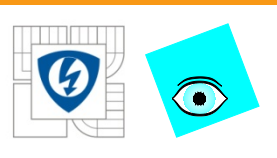
1-PFA pak představuje pravděpodobnost správného rozhodnutí o rušivosti či nízké závažnosti zdroje AE.

Metoda AE k velmi spolehlivým metodám. Následné reference dokládají vysokou spolehlivost POD detekce závažnějšího porušení metodou AE.

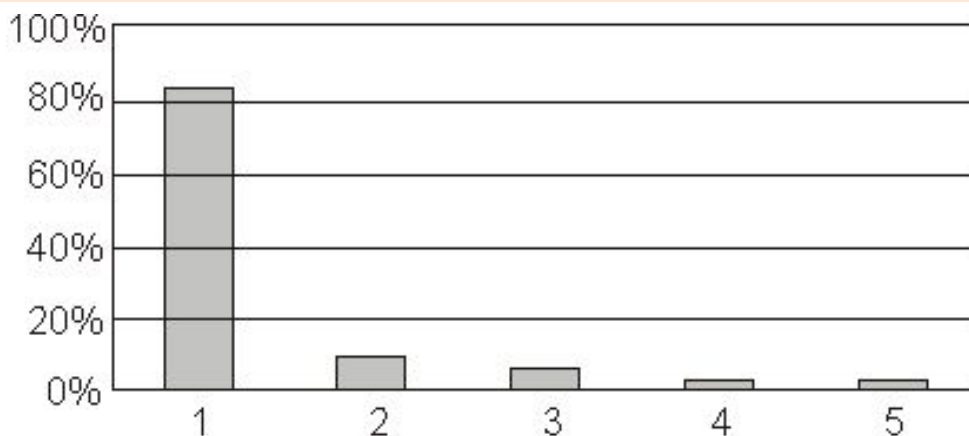
ASME Code Edition 2001 Section V, Article 1, Page 15.2 Table A110, udává pro různé NDT metody **POD** detekce trhlin klasifikované od 1 do 3 (1 je nejvyšší POD). Metoda AE je klasifikována jako 1 (1 – znamená POD 80 až 100%).

Též API 581 doporučuje metodu AE z hlediska spolehlivosti **POD** speciálně pak pro vnitřní trhliny (kde nelze použít metody povrchové), dále v případě horší přístupnosti či v případě požadavku NDT pokrytí rozsáhlejších oblastí.

Následný diagram na obr.7.1 převzatý z: *The Effectiveness of Flaw Detection Caused by Cracking Using Acoustic Emission Technique*. P.Feres, EC NDT 2006



Akustická emise – Spolehlivost



Zdůrazněme, že **POD** není dáno sloupcem 1.

POD je dáno inverzí sloupce 5 tzn.

$100\% - 2\% \text{ sloupce 5, tzn. } POD = 98\%$

PFA je pak dáno inverzí sloupce 1 tzn. $100\% - 82\%$
tzn. $PFA = 18\%$, což má odpovídat součtu sloupců
 $2+3+4 = 18\%$

**vysoká míra detekce $POD=98\%$ při rozumné
míře falešných alarmů $PFA=18\%$.**

1 - v oblasti zdroje AE skutečně nalezena nepřijatelná trhlina dle BS7910 (**1-PFA**)

2 - v oblasti zdroje AE nalezena trhlina přípustné velikosti dle BS7910

3 - v oblasti zdroje AE nenalezeny trhliny ani příznaky porušení

4 - v oblasti zdroje AE nalezeny přípustné technologické diskontinuity

5 - výskyt nepřijatelné trhliny z hlediska BS7910 bez detekce AE (**1-POD**)

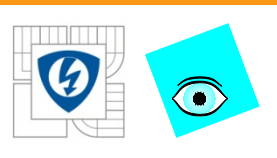
Vysoká míra spolehlivosti metody AE (vysoká míra detekce $POD=98\%$ při rozumné míře falešných alarmů $PFA=18\%$).

Ukažme jeden z důsledků pro praxi. Ve více než 95% případů zkoušených konstrukcí se závažný defekt nevyskytuje.

To znamená, že ze sta zkoušek budeme pokud se výjimečně vyskytne v detekovat závažný defekt. Ale současně budeme detekovat $95 \times 0.18 = 17$ případů jako závažný zdroj falešně.

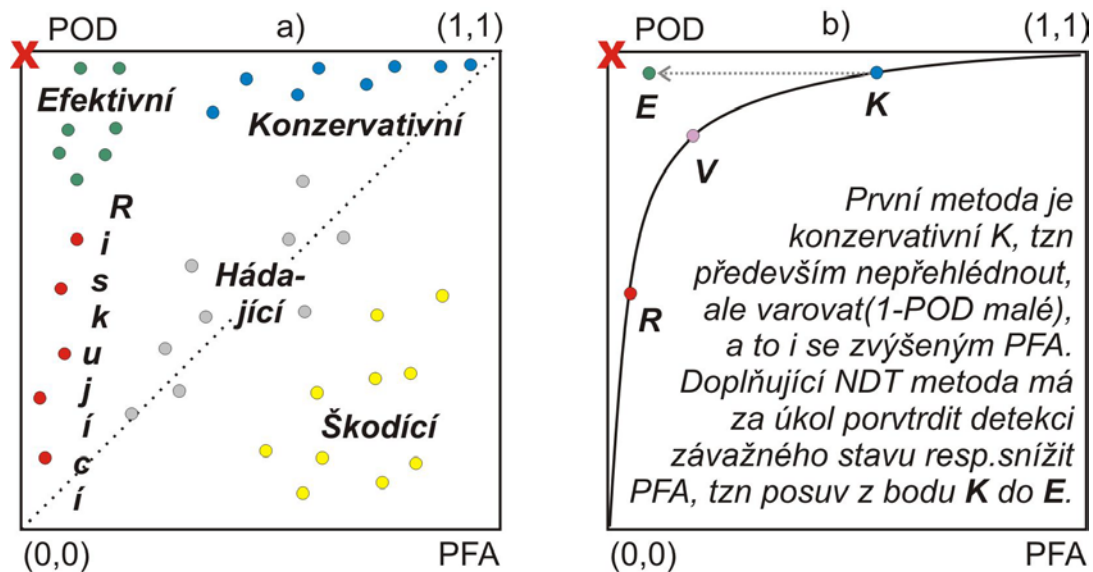
Tzn. i přes výše uvedená velmi dobrá „procenta“ POD a PFA musíme počítat s tím, že častěji nahlásíme chybně závažný zdroj AE (jako falešný alarm) než správně odhalíme závažný stav konstrukce.

I proto je důležité kombinovat metodu AE s jinými NDT metodami.



Akustická emise – Spolehlivost

Mapa ROC (Receiver Operator Curve) - mapa PFAxPOD



Vyhledávací role AE : AE detekuje při integrální tlakové zkoušce zdroj AE a UZ potvrdí či vyvrátí v lokalitě zdroje závažnou indikaci (AE vyhledává – UZ upřesňuje). Režim “**globálního**” monitorování rozsáhlé oblasti.

Upřesňující role AE : UZ detekuje při odstávce UZ indikaci a metoda AE následně v rámci On-line monitorování za provozu oblast této UZ indikace lokálně monitoruje a „kontruje“ skutečnou závažnost lokality UZ indikace. Režim “**lokálního**” monitorování vybrané lokality.

X - stoprocentně spolehlivá efektivní operátorka

Podstatné je, že data pro rozhodnutí nejsou jednoznačná a tak se díky těmto nejednoznačným datům (či výsledkům měření) nedobereme k bodu E. Proto je efektivní kombinace dvou metod rozhodování či dvou NDT metod. Ta spočívá v tom, že primární metoda vyhledávací má poskytovat spolehlivé konzervativní varování a druhá metoda toto varování upřesnit. V případě letecké bitvy o Británii (kde byla ROC zavedena) to mohlo mít takovou podobu, že radar detekoval nalétávající letadla ještě daleko nad kanálem La Manche a vydal varování. Zvýšila se pohotovost pro stíhačky k protiútoky a hlídky s dalekohledy na pobřeží začaly sledovat pečlivě oblohu. Když na pobřeží viděly nalétávající letadla, zvedly do vzduchu již připravené stíhačky. Podobným způsobem si lze představit komplexní začlenění metody AE do obecné úlohy inspekcí a eliminace havárii při potlačení zbytečných odstavení, výměn, oprav...