

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

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

Učební texty k semináři

Autoři:

RNDr. Miroslav Přibáň Ph.D.

Datum:

25.5.2012

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií CZ.1.07/2.3.00/09.0031

TENTO STUDIJNÍ MATERIÁL JE SPOLUFINANCOVÁN EVROPSKÝM SOCIÁLNÍM
FONDEM A STÁTNÍM ROZPOČTEM ČESKÉ REPUBLIKY

OBSAH

Obsah	1
1 Akustická emise – seznámte se.....	3
1.1 Akustická emise – fyzikální jev – měřicí metoda.....	3
1.2 Princip vysoké citlivosti detekce AE.....	5
1.3 Zdroje AE	6
1.4 Šíření vln AE v tělesech	7
2 Zdroje AE při zatížení kovových materiálů.	8
2.1 Faktory posilující detekovatelnost AE.	10
2.2 Zdroje AE při zatěžování ocelových konstrukcí.....	11
2.3 Vztah aktivity a intensity AE a houževnatosti.	12
3 Role AE jako NDT metody Kontrol konstrukcí.	13
3.1 Vztah AE a typických NDT metod.	15
3.2 Vyhodnocení zkoušky – zdrojů AE.	17
3.3 Spolehlivost metody AE.	18
4 Závěr.	21
5 Seznam použité literatury.....	22

1 AKUSTICKÁ EMISE – SEZNAMTE SE.

V první kapitole vymezíme pojem Akustická emise (AE) jako fyzikální jev a seznámíme se s jeho mechanismy, zdroji AE. Popíšeme přenosovou a měřicí trasu Akustické emise jako měřicí metody. Konečně zdůrazníme význam základní charakteristiky zdroje AE, a tou je detekovatelnost.

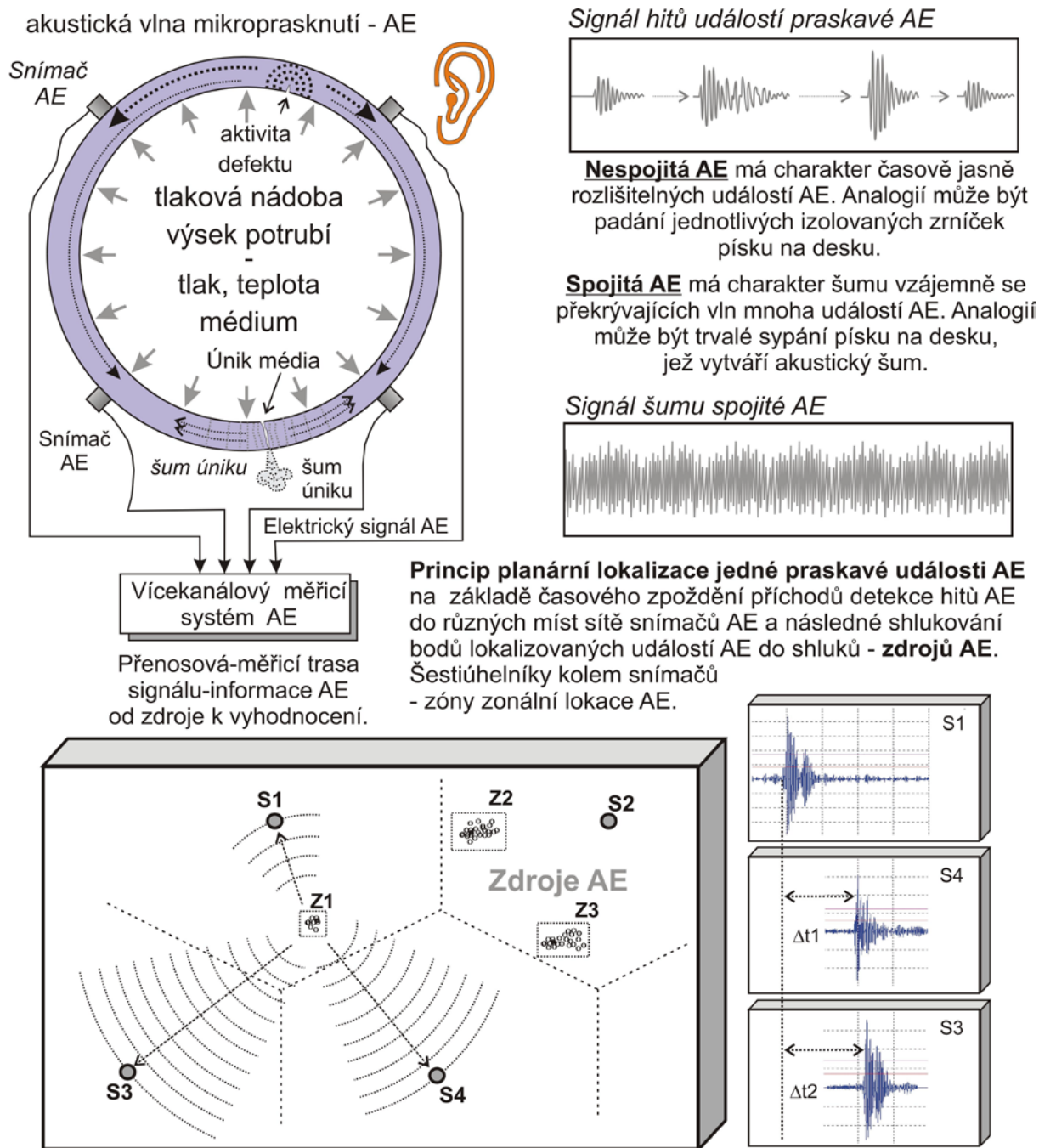
1.1 Akustická emise – fyzikální jev – měřicí metoda.

Pojem „**akustická emise**“ se objevil 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. Tyto šумы a popraskávání byly monitorovány, protože nesly informaci o přítomnosti a charakteru procesu, jež je jejich zdrojem (o mechanismu plastické deformace). První systematické práce v této oblasti jsou datovány do 50-tých let 20-tého století a jsou spojeny se jménem německého fyzika Josepha Kaisera.

Nicméně s fyzikálním jevem akustické emise se lidé setkávali odedávna a setkávají i dnes, aniž by to nazývaly Akustická emise (např. fonendoskop). Když jsem jaký kluk lezl na strom, dával jsem velký pozor, zda větev, na které stojím, nezačíná popraskávat a pokud ano, rychle jsem se snažil snížit zatížení na větev, aby se nezlomila a nezpůsobila mi vážné následky. Nasloucháním větve jsem snižoval Riziko (pravděpodobnost závažného následku – úrazu $\text{Risk} = \text{POF} \times \text{COF}$ viz. dále). „Naslouchání“ má své praktické užitečné aplikační přínosy.

Některé zvukové projevy šířící se vzduchem slyšíme lépe uchem, zaznamenáme mikrofonom. Jiné např. zmíněné praskání větve zaznamenáme mnohem citlivěji piezosnímačem detekujícím elastické napěťové vlny šířící se tělesem.

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.



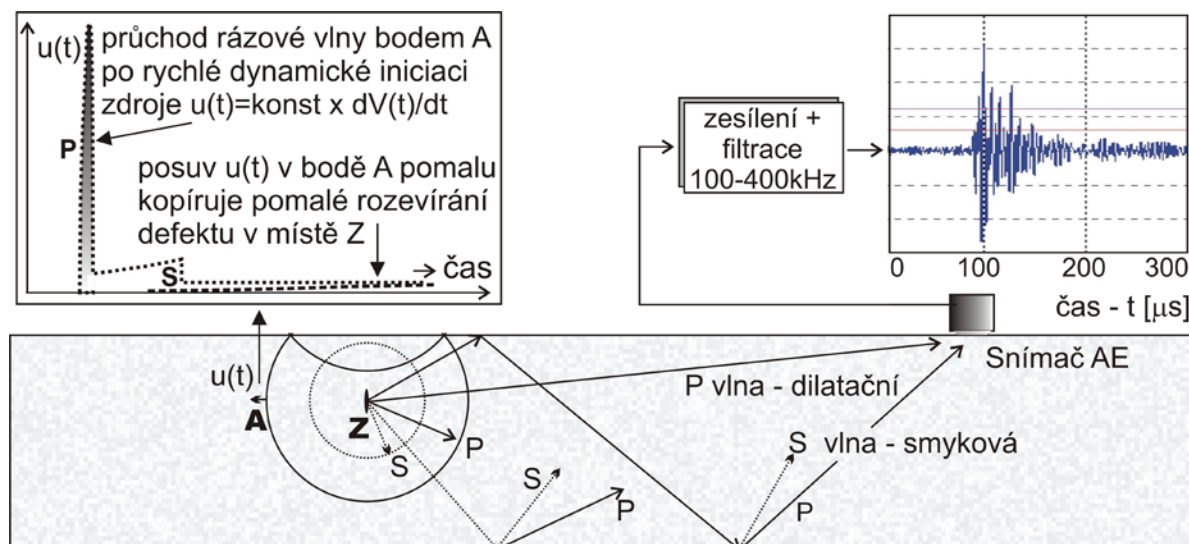
Obrázek 1.1 Základní schéma měřicí-NDT metody Akustické emise (Acoustic Testing).

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.

1.2 Princip vysoké citlivosti detekce AE.

Představme si dynamický vznik mikrotrhliny v tělese. Oproti pomalému posuvu vyvolá dynamický poskok defektu vlnu, jež je detekovatelná ještě daleko od místa vzniku např. podobně jako zemětřesení či vlna tsunami. Na obr.1.2. je zobrazena událost AE = dynamický poskok iniciace mikrotrhliny v tělese.



Obrázek 1.2 Rozdíl mezi pomalým posuvem a dynamickým poskokem defektu.
Energie vln ve vlnoploše úměrná kvadrátu rychlosti posuvu defektu.

a) Pokud by ke vzniku mikrotrhliny došlo pomalu (rozevírání stěn mikrotrhliny pomalé), posuv v místě „A“ by v čase pomalu „kopíroval“ postupné rozevírání mikrotrhliny (viz.spodní čárkovaná linie - kdy se posuvy rozkládají rovnoměrně do celého objemu tělesa).

b) Pokud však dojde k rázové-skokové iniciaci mikrotrhliny, vzniká rázová vlna uvolněné elastické energie. Tato energie zůstává koncentrována v rázové vlnoploše. Rázová vlna způsobí v okamžiku průchodu v místě „A“ krátkodobý „výkmit“ posuvů $u(t)$ mnohařádově převyšující posuvy, jež vznikají v místě „A“ při pomalému vzniku mikrotrhliny.

Dynamická měření umožňují řádově citlivější detekci posuvů než statická.

Citlivost detekce dynamických posuvů AE činí 10^{-12} až 10^{-14} m. Tato citlivost je možná pouze proto, že se jedná o dynamický výkmit. V případě pomalých statických posuvů je podobná citlivost měření posuvů či výchylek nemyslitelná.

1.3 Zdroje AE

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. kazoní 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 přemagnetování 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 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...

Podobně jako existuje různorodost zdrojů, existuje i různorodost charakteristik zvukových projevů od časové reprezentace (cvak, křup, chrrrrousst, 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.

Existuje však zásadní charakteristika aplikace AE, a to **detekovatelnost** cílových primárních zdrojů AE. Pokud jsou v podmínkách dané aplikace primární zdroje pod prahem detekce, pak ztrácí aplikace AE smysl. Pokud AE primárního zdroje detekujeme, můžeme se “bavit” o tom, jak detekovaný signál charakterizovat, vyhodnotit, interpretovat... ale pokud signál zdroje nedetekujeme, pak...?

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...

1.4 Šíření vln AE v tělesech

Vedle intensity zdroje AE a jeho frekvenčního obsahu má pro detekovatelnost zdroje zásadní vliv šíření vln AE od zdroje ke snímači (vzdálenost a geometrie trasy od zdroje ke snímači). **Prvním důvodem** poklesu se snižování hustoty energie a tím posuvů v rozšiřující se vlnoploše (kulové v prostoru r^{-2} resp. kruhové v ploše r^{-1}). **Druhým důvodem** je disperse, kdy se energie původně koncentrovaná v ostré vlnoploše při šíření v čase a prostoru rozplývá. V tenké desce to např. znamená, že se každá složka spektra pulsu šíří jinou rychlostí. V tlusté desce si to můžeme v paprskové reprezentaci představit tak, že paprsky vlnoplochy se při odrazech “rozpadají”, takže původní ostrá vlnoplocha se postupně začíná šířit jako balík různých odražených paprsků. **Třetím důvodem** je změna energie mechanické na tepelnou (šířící se vlny představují adiabatickou kompresi či expanzi). A konečně též dochází k rozptylu koncentrované energie ve vlnoploše či paprscích na vnitřní struktuře materiálu či povrchových nerovnostech.

Detekujeme-li zdroj v laboratoři z 0.05m či v praxi ze 2 až 3m metrů, pak rozdíl v amplitudě bývá 10krát až 100krát. V extrémním případě válcové tlakové nádoby ($D=4m$) můžeme detekovat Ten Test jako posloupnost mnoha hitů obvodových oběhů nádoby a jiném případě Pen Test nedetekuje ani ve vzdálenosti 1 metru (!).

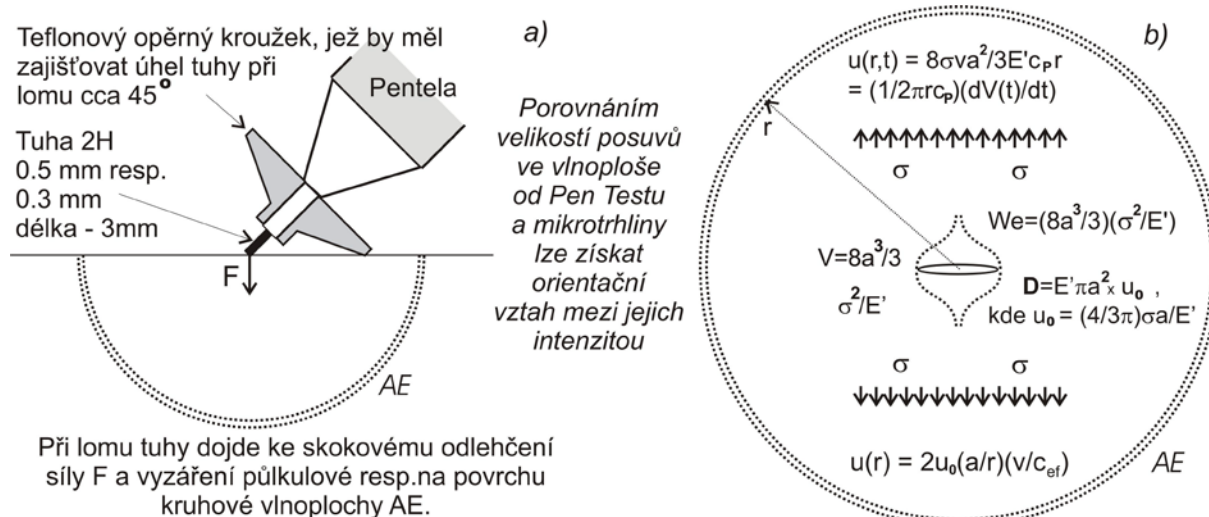
Důležité je též uvědomit si, že typické zdroje AE jsou izolovaná “prasknutí” doby trvání ΔT (s rovným frekvenčním spektrem detekovatelnosti cca do $1/\Delta T$). To, že se liší různé hodnocené časofrekvenční charakteristiky detekovaných hitů způsobuje z 90% charakter šíření vln AE od zdroje ke snímači a ne charakter zdroje. Opět jako příklad uveďme, že tentýž zdroj se při detekci v jedné geometrické konfiguraci může jevit jako ostrý detekovaný hit délky (dle dokmitu snímače desítky μs) a jindy jako hit dlouhý, trvající až několik ms.

Dle mého názoru existuje nepoměr mezi tím, kolik důrazu norem a výzkumu je orientováno na měřicí techniku a metodiku vyhodnocení signálu oproti problematice šíření elastických napěťových vln v tělesech. Může se nám tak stát, že “přijdeme” k aplikaci s drahou, špičkovou měřicí a vyhodnocovací technikou a “vyhoříme” na možných efektech spojených se šířením vlnění.

2 ZDROJE AE PŘI ZATÍŽENÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ.

Ve druhé kapitole popíšeme základní mechanismy zdrojů AE při plastické deformaci a porušování kovových materiálů. Důraz přitom položíme na otázku intenzity mechanismů a a detekovatelnost zdrojů jak v laboratoři, tak v podmínkách průmyslové praxe.

Existuje jedna rozměrem malá, významem velká pomůcka AE a tou je PenTest. Za prvé pomocí Pen Testu kalibrujeme měřicí trasy při zkouškách AE, měříme útlumy a rychlosti šíření vln. Za druhé charakterizuje intenzitu zdrojů AE jako dB odstup vůči Pen Testu (-20dB znamená intenzitu zdroje cca desetiny Pen Testu). (vyjádření intenzity zdroje v poměru k Pen Testu není sice na 100% exaktní a je pouze orientační. Ale z hlediska aplikační praxe je názorné a efektivní, viz.dále).



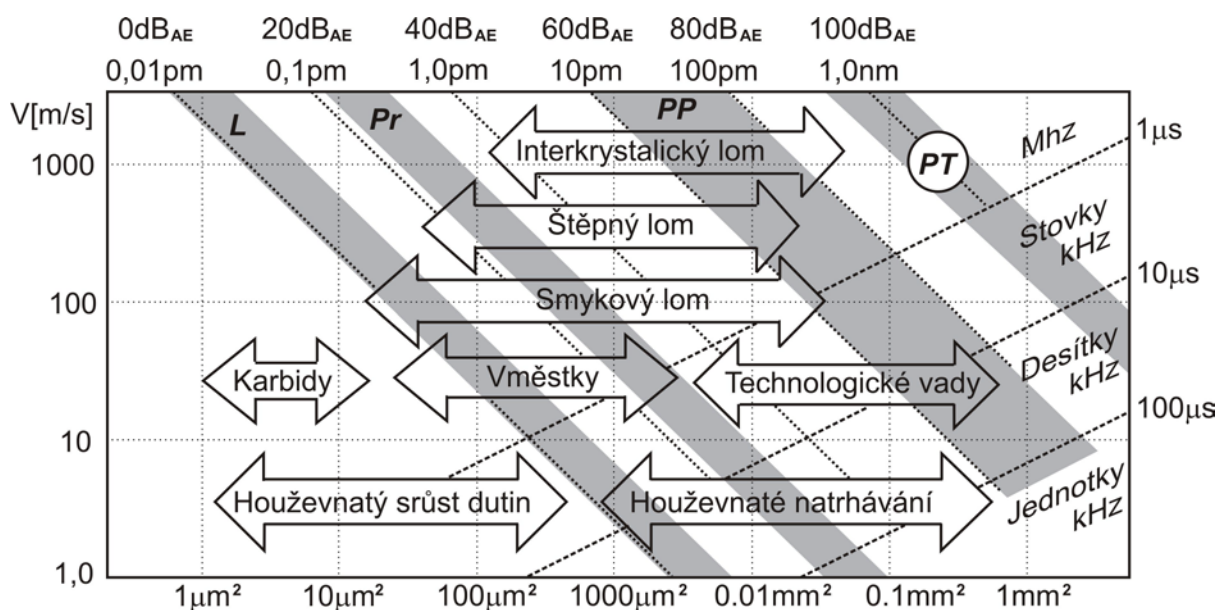
Obrázek 2.1 a) Schéma Pen Testu (Hsu-Nielsonova zdroje) v porovnání s b) vlnoplochou AE vyzářenou při vzniku kruhové mikrotrhliny průměru $2a$.

Na obr.2.1 b) je uveden vznik izolované mikrotrhliny průměru $2a$ v napětovém poli σ . Při vzniku mikrotrhliny se uvolní elastická energie W_e rovná hustotě elastické energie před vznikem krát cca objem koule opsané vzniklé mikrotrhlině. Pokud by vznik mikrotrhliny nevyžadoval žádnou disipovanou energii W_d (povrchovou či plastickou), všechna uvolněná energie W_e by se vyzářila v podobě „kinetiko-potenciální“ energie emitované vlnoplochy elastických vln AE (W_{ae}). Tato energie AE je úměrná v^2 , kde v je rychlost poskoku defektu. V případě bez disipace, kdy $W_d=0$, je $v=c_{ef}$ rychlost blízká rychlosti některého módu šíření vln zvuku v daném materiálu.

$$W_e = W_d + W_{ae} \text{ kde } W_{ae} = W_e (v/c_{ef})^2 \text{ resp. } (v/c_{ef})^2 = 1 - W_d/W_e \quad (2.1)$$

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 trhlina rozvíjí pomalu a podíl AE z uvolněné energie je nízký až prakticky nulový.

Toto vše shrnuje známý Scrubyho diagram detekovatelnosti v modifikované podobě uvedený na obr.2.2, který uvádí posuvy a detekovatelnost pro izolované kruhové mikrotrhliny plochy $S = \pi a^2$, v oceli v tahovém poli $\sigma = 500 \text{ MPa}$, ve vzdálenosti $r = 50 \text{ mm}$. Intenzita Pen Testu je vyznačena v tomto případě v kruhu s označením **PT**. Vidíme pás **L** vymezující detekovatelnost v optimálních laboratorních podmínkách při detekci setin pm (jednotek μV). Vidíme pás **Pr** detekovatelnosti pro $r = 0.05 \text{ m}$ v dobrých průmyslových podmínkách při prahu detekce cca desetiny pm (cca 30 dB_{AE}). Konečně vidíme pás **PP**, jež odpovídá detekovatelnosti v průmyslových podmínkách při započtení vzdálenosti cca 1 až 3 metrů oproti $r = 0.05 \text{ m}$. Vidíme posun detekovatelnosti proti laboratorním podmínkám o 60 dB ($1000\times$). Z obr.2.2 plyne, že v průmyslových podmínkách detekujeme daný zdroj při ploše poskoku cca setin až desetiny mm^2 , tzn. při průměru desetiny mm. To je rozměr mnohem větší než typický rozměr struktury ocelí. Tzn. dynamické posuvy defektů na úrovni typických rozměrů struktury ocelí (např. velikost zrna) v průmyslových podmínkách nedetekujeme.



Obrázek 2.2 Schéma detekovatelnosti zdroje vzniku izolované mikrotrhliny v oceli.

2.1 Faktory posilující detekovatelnost AE.

V předchozí části jsme viděli, že v průmyslových podmínkách je detekce AE vázaná na vznik izolované mikrotrhliny na úrovni typických rozměrů struktury ocelí nereálná. Jak je tedy možné, že AE v praxi funguje? Přispívají k tomu dva faktory uvedené na obr.2.3. **Za prvé a)** je to zesilovací faktor makrotrhliny. Pokud se uvolní elastická energie “poskokem” čela trhliny (či iniciací mikrotrhliny v blízkosti čela trhliny či propojením mikrotrhliny s makrotrhlinou), uvolní se řádově větší množství energie W_e a nadto s větším podílem ve formě AE tzn. W_{AE} . Zesilovací faktor trhliny dosahuje hodnot cca 10x až 100x při té samé velikosti plochy “poskoku” trhliny.

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.



Obrázek 2.3 Faktory posilující detekovatelnost AE při porušování materialu.

Za druhé b) je to díky lavinám posuvů-“poskoků” defektů. Je to tomu tak v případě detekce plastické deformace, kdy detekujeme AE na výrazné mezi kluzu pouze, pokud dochází k souběžným hromadným posuvům “lavinám” dislokací. Podobně, při iniciaci porušení či růstu trhliny dochází k efektům natržení větší oblasti desetin mm až mm (mikropopiny), jež vedou k detekovatelné AE i v průmyslových podmínkách. Uvedme názorný případ. Uvažujme růst trhliny vodíkovým praskáním – křehké poskoky čela trhliny. Na lomové ploše uvidíme lomové fazety velikosti $10^1 \mu\text{m}$, resp. 10^{-4} až 10^{-3}mm^2 . Tzn. tisíce lomových fazet na 1mm^2 . Při detekci metodou AE však v podmínkách odpovídajících praxi budeme detekovat cca jen jednotky událostí na 1mm^2

(či dokonce 1 událost AE na několik mm^2) přírůstku lomové plochy trhliny. Tzn. na několik tisíc fazet jen jednotky “lavin” současného protržení větší plochy detekovatelné metodou AE v průmyslových podmínkách.

Je to hodně nebo málo detekce desítek až stovek událostí AE na přírůstek plochy trhliny 1cm^2 či na plastickou deformaci objemu 10cm^3 ? Tuto otázku budeme diskutovat v následné kapitole 3. Ale základní odpověď zní, že AE využíváme při provozních kontrolách konstrukcí pro detekci rozvoje defektů či plastické deformace až v pokročilé fázi rozvoje „závažnosti“, kdy jejich aktivita a intenzita se zatížením či „závažností“ výrazně narůstá. Velmi zjednodušeně a názorně: „*Má-li dojít k porušení stěny z oceli síly např. 2cm (plocha 10cm^2), pak se to obvykle spolehlivě projeví v detekované AE*“.

2.2 Zdroje AE při zatěžování ocelových konstrukcí.

Při standardních zkouškách AE cílených na detekci rozvoje plastické deformace resp. porušení můžeme detekovat následné mechanismy zdrojů AE.

Laviny dislokací “současně odtržené od překážek” na výrazné mezi kluzu. “Poskoky” jednotlivých dislokací nejsou detekovatelné ani v laboratorních podmínkách.

Dekoheze či lom nekovových složek struktury materiálu vměstky (MnS, cementit v perlitu, technologické vady ve svarech...)

Iniciace křehkých mikrotrlin na čele trhliny resp.

Růst trhliny (detekovatelnost závisí na mechanismu růstu).

Svírání a rozevírání stěn trhliny při jejím zatížení/odlehčení.

Lom resp. dekoheze korozní vrstvy na plasticky se deformujícím podkladu, nad rozevírající se trhlinou resp. korozní vrstvy rostlé do povrchové trhliny.

V případě tlakových zařízení též detekce úniku přes průchozí trhlinu.

Pro standardní zkoušky AE je požadována citlivost detekce měření čtvrtiny až desetiny Pen Testu ze všech míst měřicí site AE.

2.3 Vztah aktivity a intensity AE a houževnatosti.

Objasnili jsme si již zásadní vliv rychlosti v poskoku defektu na množství energie vyzařené 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.

**A právě snížení houževnatosti odezvy materiálu (viz. uvedené faktory)
vede též ke zvýšení detekovatelnosti metodou AE.**

3 ROLE AE JAKO NDT METODY KONTROL KONSTRUKCÍ.

Ve třetí kapitole ukážeme na roli AE v rámci celkového přístupu různých opatření, fází a bariér, jež mají předcházet provozním haváriím konstrukcí a zajišťovat tak jejich bezpečný provoz, resp. provoz s přijatelným rizikem.

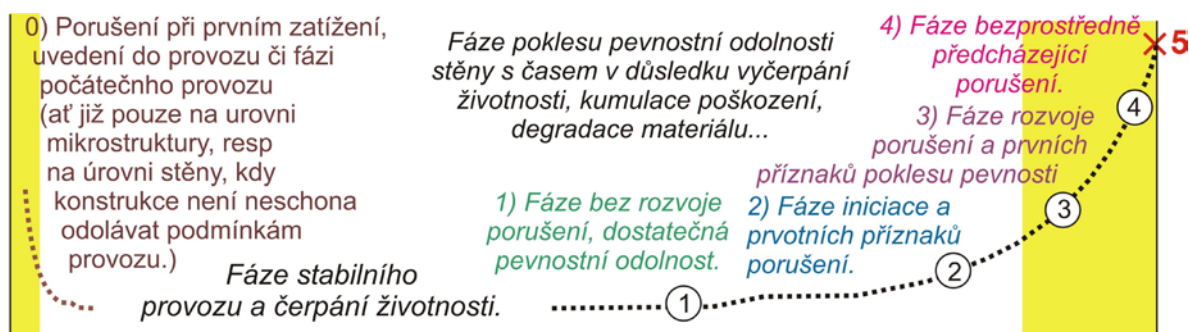
Na obr.3.1 nahoře vidíme vanovou křivku pravděpodobnosti havarijního porušení konstrukce v rámci její životnosti. (0) Počáteční zvýšení odpovídá možnosti špatně navržené/vyrobené konstrukce neschopné odolávat provozním podmínkám. Následuje stabilní čerpání životnosti (1), kdy je pravděpodobnost porušení na minimu. Po jisté době může začít docházet k iniciaci porušení v nejslabších místech konstrukce (2), jež postupně či rychleji přechází v rozsáhlejší porušení stěny (3) (vzniku závažné provozní trhliny). To může vyústit v havarijní porušení celistvosti stěny (4,5). Dle závažnosti následků havarijní situace (4,5) se snažíme postupně klást bariery tomu, aby k situaci (4,5) nedošlo. A to od fáze předprovozní, od návrhu a technologie konstrukce, přes výrobní a povýrobní kontroly, monitorování podmínek provozu a NDT kontroly, jež mají za cíl predikovat a odhalit přechod z fáze (1) do fáze (2 či 3), až po NDT kontroly, jež mají za úkol zachytit ve fázi (3 až 4) závažný až kriticky závažný stav před konečným havarijním porušením (5). Konečně uvedme přístup „porušení za kontrolovaných podmínek“ (tlaková zkouška) či projektem uvažované porušení (LBB) pokryté havarijními opatřeními ke snížení následků. K pokrytí rizika porušení = $POFxCOF$ (Probability of Failure) x (Consequence of Failure) tak slouží **celý** tento řetězec bariér od fáze (0) do fáze (5).

Kde lze v tomto schématu najít přínos aplikace metody AE?

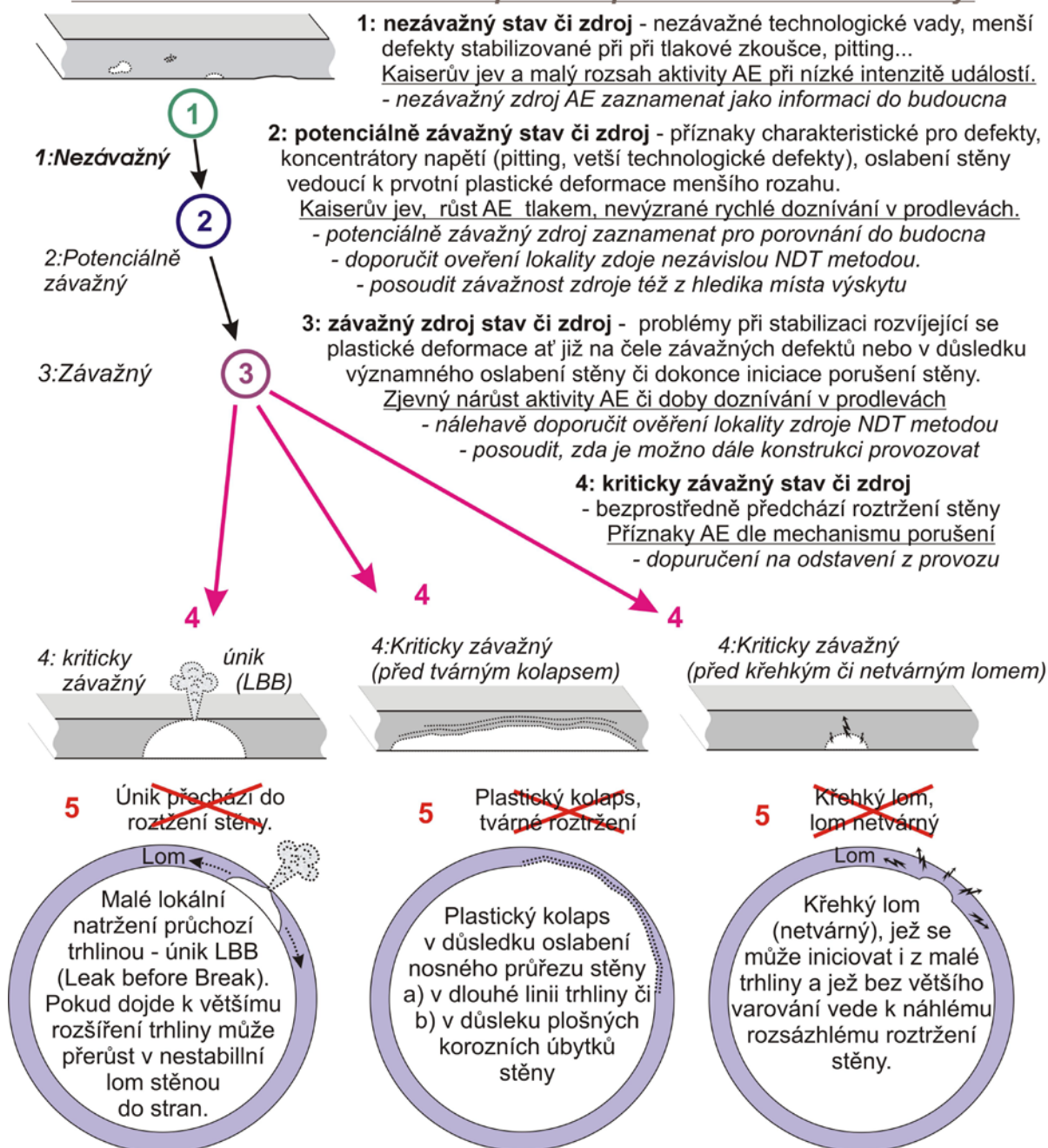
Za třetí ve fázi (0) tzn. při povýrobní či předprovozní tlakové zkoušce resp. při monitorování AE při prvním náběhu a v prvních fázích provozu konstrukce.

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).



Obecná kvalitativní klasifikace poklesu pevnostní odolnosti stěny.



Obrázek 3.1 K textu role AE v rámci provozních kontrol konstrukcí.

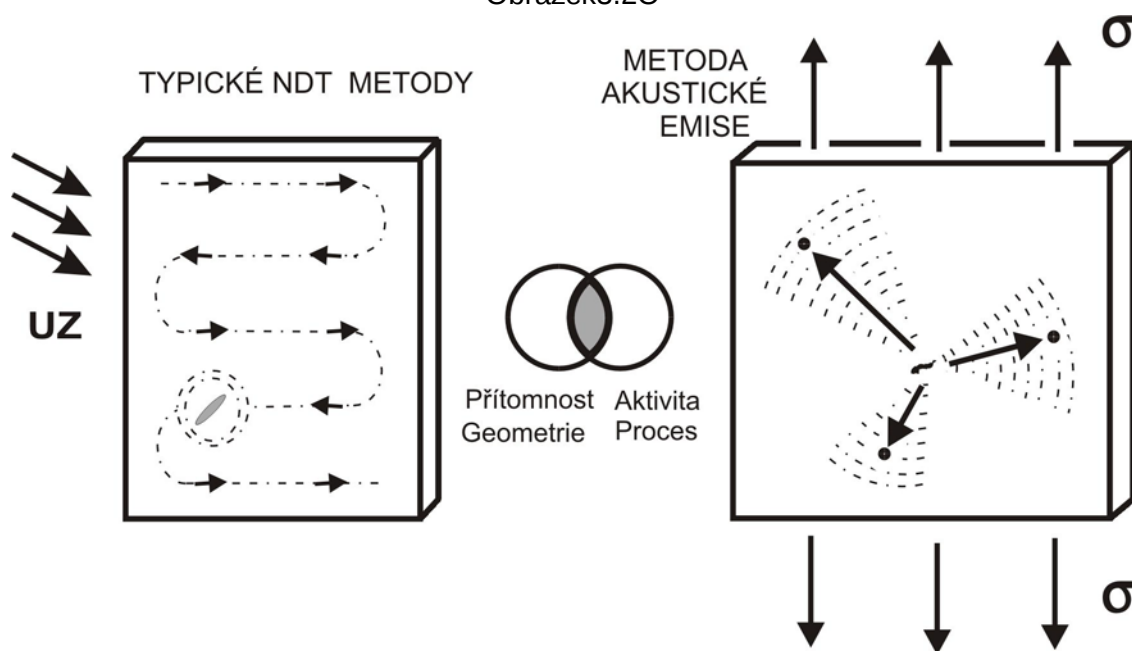
3.1 Vztah AE a typických NDT metod.

Schopnost metody AE detekovat přítomnost a aktivitu defektů řadí metodu AE mezi NDT defektoskopické metody. Nicméně existuje řada principiálních rozdílů mezi metodou AE a typickými NDT metodami.

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.

Metoda AE detekuje a charakterizuje rozvoj procesu. Pracuje s cílem „odposlechu“ akustické aktivity emitované procesy probíhajícími v materiálu (plastické 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**.

Obrázek3.20



Obrázek 3.2 Metoda AE a typické NDT metody se z podstaty svého principu poskytovanými informacemi nepřekrývají, ale vhodně doplňují.

Zdůrazněme významné vlastnosti AE jako NDT metody z hlediska jejího nasazení v praxi, vlastnosti plynoucí přímo z jejího fyzikálního principu:

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 a tím **reálnou závažnost** 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.

AE obvykle detekuje rozvoj defektů či plastické deformace až v pokročilé fázi závažnosti (z hlediska oslabení pevnosti), kdy aktivita a intenzita AE se zatížením či „závažností“ výrazně narůstá.

Metoda AE není universální. Efektivnost a přínos nasazení metody AE závisí výrazněji než u typických NDT metod na typu konstrukce, typu materiálu, režimu nasazení, na historii provozu a zatížení, na tom jaké mechanismy a procesy předpokládáme při zkoušce detekovat, v jakém režimu zatížení či provozu AE měříme, na podmínkách rušení...

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).

3.2 Vyhodnocení zkoušky – zdrojů AE.

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 obr.3.1 jako „Nezávažný“, „Potenciálně závažný“, „Závažný“, „Kriticky závažný zdroj“.

Výsledkem zkoušky AE je tak (mimo jiné informace v protokolu, jež se týkají provedení zkoušky) **Identifikace zdrojů**, jejich stručný popis (charakteru AE, času a místa procesu – zdroje AE), **Klasifikace každého jednotlivého zdroje** zahrnující **doporučení** dalšího postupu vyplývající ze závažnosti klasifikace zdroje.

3.3 Spolehlivost metody AE.

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** proto, abychom neopominuli či nepodhodnotili žádný 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.

Obecně lze spolehlivost NDT zkoušek charakterizovat pomocí dvojice dvou pravděpodobností POD a PFA (viz.též ROC diagram).

POD - Probability of Detection (pravděpodobnost detekce závažného stavu) znamená pravděpodobnost, že závažný stav detekujeme, **je-li přítomen.** "

1-POD naopak představuje pravděpodobnost přehlédnutí či podcenění skutečně existujícího závažného stavu.

PFA - Probability of False Alarm (pravděpodobnost falešného hlášení závažného stavu), znamená pravděpodobnost, že nahlásíme falešný alarm v případě, kdy závažný stav ve skutečnosti není přítomen.

POD a 1-PFA reprezentují pravděpodobnosti správných rozhodnutí či klasifikace

PFA a 1-POD reprezentují pravděpodobnosti nesprávných rozhodnutí

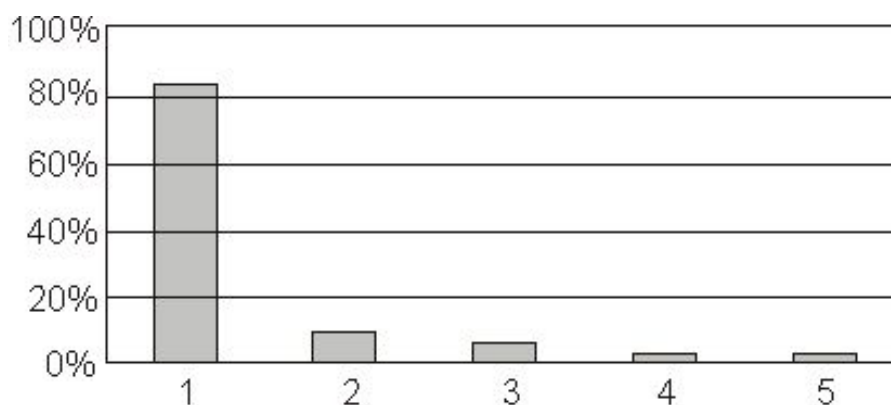
Posudíme na základě POD a PFA spolehlivost AE při tlakových zkouškách.

Následné reference dokládají vysokou spolehlivost **POD** detekce závažnějšího porušení, defektů či trhliny metodou AE. Detekovatelnost AE je dána především detektabilitou AE (citlivostí detekce vyšší cca než desetina až pětina Pen Testu).

ASME Code Edition 2001 Section V, Article 1, Page 15.2 Table A110, udává pro NDT metody **POD** detekce trhlín 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 případech horší přístupnosti či při požadavku NDT pokrytí rozsáhlejších oblastí.

Následný diagram na obr.3.3 převzatý z: *The Effectiveness of Flaw Detection Caused by Cracking Using Acoustic Emission Technique*. P.Feres, EC NDT 2006, Sao Paulo Brasil) ukazuje na vysokou spolehlivost POD detekce AE.



- 1 - v oblasti zdroje AE skutečně nalezena nepřipustná trhlina dle BS7910
- 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 nepřipustné trhliny z hlediska BS7910 bez detekce AE

Obrázek 3.3 Spolehlivost detekce závažných defektů metodou AE při tlakových zkouškách.

Zdůrazněme, že **POD** není dáno sloupcem 1. **POD** je dáno inverzí sloupce 5 tzn. 100% - 2% 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%

To je skvělý výsledek. Přesto ve více než 95% případů zkoušených konstrukcí se závažný defekt nevyskytuje. To znamená, že ze sta zkoušek budeme, pokud se výjimečně závažný defekt vyskytne, tento závažný defekt skutečně detekovat.

Ale současně budeme statisticky detekovat $95 \times 0.18 = 17$ případů jako závažný zdroj falešně! A tím nutit provozovatele k závažným a ve svém důsledku nákladným doporučením. I proto je důležité kombinovat metodu AE s jinými NDT metodami. Zvýšenou **PFA** je vhodné snížit doplněním následnou nezávislou informací (NDT kontrola, posouzení pravděpodobnosti vzniku porušení v místě zdroje,...). AE tak hraje roli konzervativní metody s vysokým stupněm **POD** a zvýšeným stupněm **PFA**, kde **PFA** snižujeme díky kombinaci s následnou NDT kontrolou lokality zdroje AE. Tato role se může měnit.

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 indikaci a metoda AE následně při tlakové zkoušce či v rámci On-line monitorování za provozu oblast této UZ indikace lokálně monitoruje a doplňuje informaci o skutečné závažnosti lokality UZ indikace. Režim “lokálního” monitorování vybrané lokality.

Lze uvést i další příklady přínosu kombinace metody AE a typické NDT kontroly v závislosti na konkrétní konstrukci a strategii zajištění bezpečnosti provozu.

Komplementarita AE – přínos a efektivita vzájemného doplnění metody AE vybrané NDT metody (resp. obecně vzájemné doplnění s dalšími informacemi), znamená, že metoda AE obvykle nevystupuje při provozních kontrolách jako izolovaná metoda, která by sama rozhodovala o hodnocení (dobrá/špatná či přípustná/nepřípustná).

Pozn: V normách uvedené přípustné UZ indikace jsou obvykle takové, že hlásí nepřípustný defekt již při velikosti, kdy zdaleka ještě není závažný, tzn. PFA vzhledem k dalšímu provozu konstrukce je mnohem vyšší než u AE.

4 ZÁVĚR.

Tento učební text se v daném rozsahu nemohl věnovat všem aspektům jak Akustické emise jako fyzikálnímu jevu, tak Akustické emisi jako měřicí metodě. Zaměřil se na jeden aspekt AE, a to na AE jako NDT metodu v rámci provozních kontrol ocelových konstrukcí. Důraz byl přitom položen na nastínění otázky detekovatelnosti mechanismů zdrojů AE jako základní podmínky úspěšné aplikace AE. Důraz byl též položen na objasnění role AE v celkovém řetězci přístupů pokrytí rizika havarijního porušení konstrukcí resp. k zajištění bezpečnosti provozu.

Doložili jsme, že metoda AE (pokud je zajištěna detekovatelnost zdroje AE) patří ke spolehlivým metodám detekce rozvoje závažnějšího porušení resp. snížené pevnostní odolnosti s přiměřeně zvýšenou pravděpodobností falešného „hlášení“ detekce závažných zdrojů AE. Tento handicap pak překonává metoda AE doporučením na doplnění identifikovaných zdrojů AE o nezávislou kontrolu jinou NDT metodou a posouzením lokality z hlediska pravděpodobnosti toho, že v dané lokalitě zdroje může k rozvoji porušení dojít.

V rámci prezentace a přednášky pak budou vybrané otázky popsány podrobněji a to jak v oblasti popisu AE jako měřicí metody včetně měřicí techniky, postupů vyhodnocení, ale též z hlediska klasifikace závažnosti zdrojů.

5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Miller R.K, McIntire P.: ASTM NDT Handbook. Volume 5 Acoustic emission, OH 1987
- [2] M.Přibáň: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí – Metoda akustické emise ČNDT Brno 2008:
- [3] Rodgers L.M.: Structural and Engineering Monitoring by Acoustic Emission Methods – Fundamentals and Applications, Lloyds Register 2001
- [4] Přibáň M.: Certifikace pracovníků NDT – AT2, Paha 2010.

Ústav automatizace a měřicí techniky
VUT v Brně
Kolejní 2906/4
612 00 Brno
Česká Republika

<http://www.crr.vutbr.cz>

info@crr.vutbr.cz