

Hodnocení a klasifikace závažnosti zdrojů akustické emise z hlediska zajištění bezpečnosti provozu tlakových nádob a potrubí v chemickém průmyslu.

M.Přibán, J.Vlach, ¹P.Hora

ACES, 5.května 641, 38701 Volyně, aces.priban@iol.cz; ²UT AV ČR - CDM Veleslavínova 11, 30114 Plzeň, hora@cdm.it.cas.cz

Úspěšnost a efektivnost aplikací nejen metody akustické emise (AE) závisí na využitelnosti a hodnotě informací, kterou daná metoda poskytuje. Princip metody akustické emise (AE) je na první pohled zřejmý, jednoduchý a názorný. Z principu metody AE vyplývá celá řada velmi užitečných schopností jako :

- metoda AE poskytuje integrální objemovou kontrolu celé konstrukce (i rozsáhlé) včetně míst nepřístupných či obtížně/nákladně zpřístupnitelných
- metoda AE detekuje současně s přítomností defektů též přítomnost podmínek pro rozvoj defektu
- metoda AE umožňuje monitorování-kontrolu konstrukce za jejího provozu, včetně možnosti trvalého provozního monitorování

Princip metody akustické emise a z něj vyplývající aplikační potenciál způsobil po prvních úspěšných aplikacích na jedné straně velká očekávání. Na druhé straně výskyt neúspěšných aplikací vytvořil ohledně metody AE oprávněný názor, že metoda AE představuje na jedné straně významný aplikační potenciál, na druhé straně však též zvýšený stupeň nejistoty ohledně hodnocení výsledků. A právě nejistota ohledně výsledků hodnocení výrazně snižuje aplikační hodnotu metody AE. Otázka zní, je nejistota výsledků metody AE její nedílnou součástí vyplývající z jejího principu, či je tato nejistota způsobena ne vždy správnou metodikou nasazení či vyhodnocení.

1.cílem příspěvku je na výše uvedené otázku stručně odpovědět a ukázat několik konstatování.

- Metoda AE není metodou universální. Je nutno dobře zvážit, kdy a za jakých okolností má nasazení metody AE smysl a zda je schopno přinést podstatné a spolehlivé informace pro hodnocení konkrétní konstrukce.
- Specifika každé konkrétní aplikace či třídy podobných aplikací mohou být natolik odlišná, že je nutno velmi kriticky zvážit možnost přenosu metodiky a zkušeností z jedné aplikace na druhou. Nelze automaticky přenášet metodiku měření a vyhodnocení z jedné konstrukce na druhou.
- Existují oblasti, jejichž znalost je nutno prohloubit, abychom byly schopni rychle a efektivně posoudit vhodnost nasazení metody AE a vytvořit optimální metodiku nasazení a hodnocení AE.

Nicméně jsme přesvědčeni, že již v současné době je možno aplikovat metodu AE s velmi vysokou oprávněností a spolehlivostí poskytnutých výsledků. Současně je však nutno varovat před rutinními aplikacemi bez řádného zvážení všech aspektů aplikace. V tomto případě může vést aplikace k ne zcela správným a podloženým závěrům.

2.cílem příspěvku je prezentovat práce, které v rámci sdružení ACES a CDM UT AV ČR realizujeme se záměrem vytvořit exaktní podklady pro tvorbu podložených, aplikačně efektivních procedur AE včetně problematiky zařazení výsledků zkoušek AE do celkového schématu hodnocení bezpečnosti, spolehlivosti, přípustnosti provozu konkrétní konstrukce či jejího uzlu.

1. Úvod - princip jevu a metody akustické emise.

Akustickou emisí (AE) nazýváme akustické vlny generované dynamickým uvolněním resp. vybuzením elastické energie uvnitř materiálu tělesa nebo procesem působícím na jeho povrchu

Metodou AE nazýváme metodiku detekce akustické emise na povrchu tělesa, jímž se emitované vlny šíří, následně metodiku elektronického zpracování a vyhodnocení parametrů detekované AE

Zdrojem AE nazýváme libovolný fyzikální jev, resp. proces, který generuje akustickou emisí (např. počátek plastická deformace materiálu, dekoheze/lom inkluzí či nekovových složek struktury materiálu, iniciace mikrotrhliny, růst trhliny, svírání/rozevírání trhliny, lom/dehoheze korozní vrstvy, únik média pod tlakem přes trhlinu či netěsnost, podcházení ventilů, klepání, šoupání, tření...).

Princip jevu akustické emise.

Na obr.1. je zobrazen zdroj AE - např. iniciace mikrotrhliny v tělese. Od zdroje se tělesem šíří dvě kulové vlnoplochy dilatační P a smykové S vlny. Sledujme posuvy povrchu $u(t)$ v místě A .

Pokud by ke vzniku mikrotrhliny došlo pomalu - posuv v místě A by v čase pomalu kopíroval postupné rozevírání mikrotrhliny (viz. spodní čárkovaná linie obrázku vlevo nahoře).

Pokud dojde k dynamické iniciaci mikrotrhliny, vzniká rázová vlna uvolněné potenciální a kinetické energie. Tato energie zůstává koncentrována v rázové vlnoploše, která tak nese v místě A mnohařádově vyšší hodnoty posuvů $u(t)$ než v případě pomalého vzniku mikrotrhliny, kdy se posuvy rozloží rovnoměrně do celého objemu tělesa (viz. tečkovaná špice posuvů).

Konečný posuv v bodě A na obr.1: $u(t \rightarrow \infty)$ je na rychlosti vzniku mikrotrhliny nezávislý. Ovšem díky vzniku přechodové dynamické rázové vlny je detekce dynamického pohybu defektu mnohem vyšší oproti detekci těže pomalé změny.

Princip jevu akustické emise platí též pro další zdroje rázových vln v tělesech, nejen pohyb defektů, např. poklep, turbulence-tlakové fluktuace ve štěrbině netěsnosti/úniku...

Šíření vln akustické emise tělesem.

Od zdroje se v případě tlusté desky šíří dvě kulové vlnoplochy dilatační P a smykové S vlny. Vlnoplochy si můžeme představit jako soubor akustických paprsků, které se šíří tělesem, odrážejí se, rozpadají na různé módy. V případě tenké desky se vybudí přechodový soubor Lambových vln, který se dále šíří tělesem. V závislosti na geometrii tělesa vzniká složitá dynamická napjatost tělesa, kterou detekujeme v místě snímače AE jako výsledný elektrický signál zobrazený též na obr.1.

Vymezení metody Akustické emise.

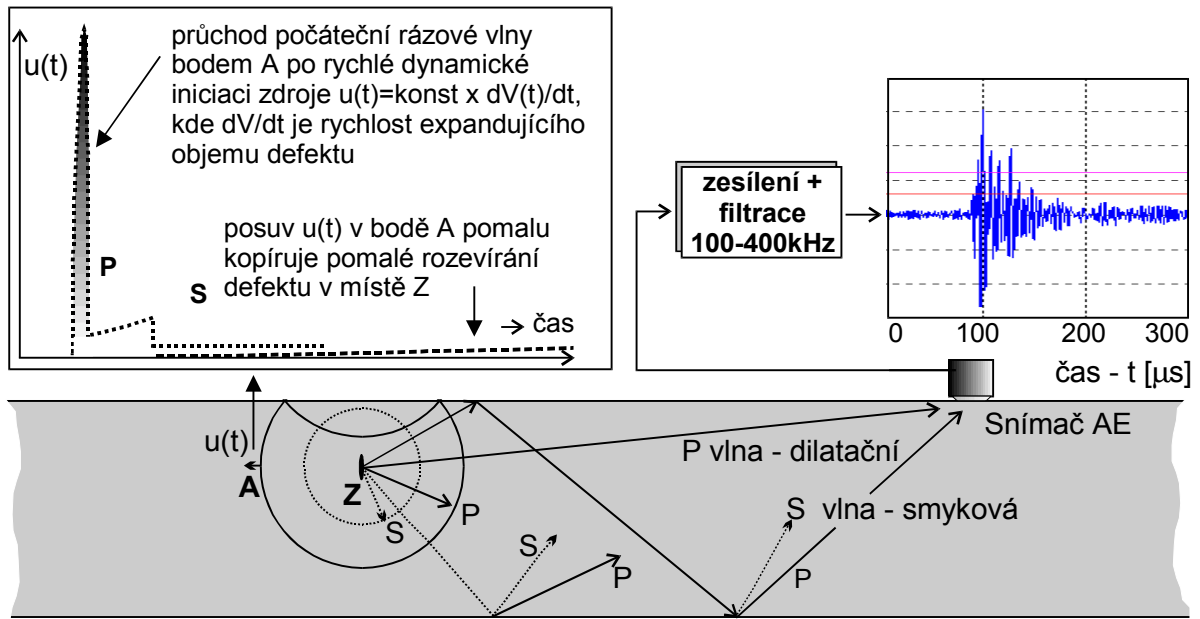
Metoda AE spočívá v detekci a vyhodnocení akustických vln šířících se monitorovanou konstrukcí - vln generovaných procesy v materiálu konstrukce či na jejím povrchu. Metoda AE patří k metodám akustickým, tzn. využívajícím šíření elastických napět'ových vln tělesem.

Typické znaky pro metodu AE, které ji vymezují oproti jiným akustickým metodám jsou :

- Nevnáší do konstrukce žádné aktivní buzení - pasivně monitoruje probíhající procesy.*
- Frekvenční pásmo detekovaných vln se pohybuje od 30kHz do 1MHz - (nejčastěji v pásmu cca 100÷300 kHz) - tzn. typická vlnová délka v ocelích řádově desítky mm.*
- Detekce frekvenčně širokopásmových procesů s cílem maximální citlivosti detekce sledovaných procesů pomocí rezonančních snímačů ve vhodně vybraném frekvenčním okně*

Obr.1:

Princip jevu **AKUSTICKÉ EMISE** a jeho detekce



V tlustostěnné konstrukci se ze zdroje AE (Z) se šíří počáteční kulové vlnoplochy dilatační P a smykové S vlny, které můžeme zobrazit jako svazek paprsků, jež se následně v tělese šíří, odráží a rozpadají - vytváří výslednou odezvu zdroje Z detekovaného v místě snímače AE. V případě tenkostěnných konstrukcí se puls AE šíří kombinací kombinací Lambových vln.

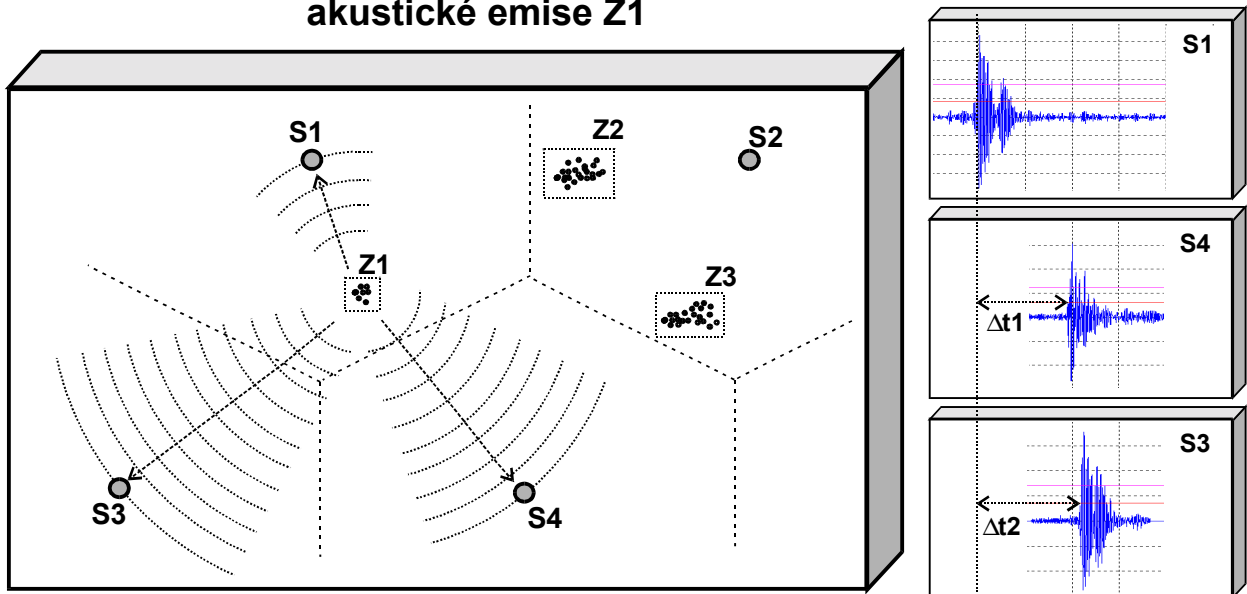
1. Lambova symetrická vlna



1. Lambova antisymetrická vlna



Příklad rovinné Δt lokalizace události zdroje akustické emise Z1



Princip Δt lokalizace je odvozen z určení zpoždění, se kterým je signál emisní události detekován v různých snímačích měřicí sítě. Na základě Δt lokalizace dochází v místech opakování aktivity AE ke vzniku shluků lokalizovaných událostí AE - shluky bodů - a tím k detekci a lokalizaci zdrojů aktivity AE (Z1 až Z3). Cílem metody AE je detekovat zdroje AE a vyhodnotit jejich původ, resp. vyhodnotit jejich závažnost vzhledem k provozuschopnosti konstrukce

2. Vymezení metody AE vůči typickým NDT metodám a její přínos v rámci kontroly iniciace a rozvoje defektů tlakových nádob a potrubí.

Detekce a monitorování rozvoje plastické deformace, aktivity defektů, iniciace a rozvoje porušení materiálu řadí metodu AE mezi nedestruktivní (NDT) metody zkoušení konstrukcí. Vymezení metody AE ve vztahu k typickým NDT metodám spočívá v jejich vzájemném doplnění. [1,2,3,4]. Metoda AE podává principiálně odlišnou a nezávislou informaci oproti typickým NDT metodám. Metoda AE má schopnost poskytnout informace typickými NDT metodami nedostupné. Metoda AE a typické NDT metody se z podstaty svého principu poskytovanými informacemi a režimem nasazení nepřekrývají, ale doplňují.

Typické NDT metody charakterizují stav porušení, pracují s cílem vhodného „zviditelnění“ přítomnosti defektu v materiálu konstrukce. Přítomnost defektu se projeví změnou intenzity záření, v šíření a odrazech UZ vln, změnou toku vířivých proudů, resp. magnetického toku, zviditelnění defektu penetrační kapalinou. 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 rozvoj mikrotrhlin a trhlin, svírání a rozevírání trhlin apod). Metoda AE detekuje, lokalizuje a hodnotí aktivitu defektů a rozvoj procesů právě a pouze v jejich průběhu a vzhledem ke skutečným podmínkám a režimu zkoušky, či provozu, vzhledem ke skutečnému stavu materiálu konstrukce... Metoda AE detekuje přítomnost defektu zároveň s přítomností podmínek pro jeho rozvoj.

Zdůrazněme tři významné přednosti metody AE z hlediska jejího nasazení v praxi, přednosti plynoucí přímo z jejího fyzikálního principu :

Metoda AE je metoda integrální a objemová. Detekuje rozvoj defektů „na dálku“, tzn. z celé monitorované oblasti konstrukce osazené snímači AE. Detekuje defekty povrchové i vnitřní, defekty z nepřístupných míst, resp. míst, jejichž zpřístupnění je nákladné. Konstrukce je v praxi monitorována sítí snímačů. To zajišťuje kontrolu celé konstrukce, či její vybrané oblasti současně v rámci jedné zkoušky. Síť snímačů umožňuje lokalizaci zdroje detekované AE.

Metoda AE detekuje rozvoj defektu a sleduje jeho průběh v reálném čase procesu a v reálných podmínkách zatížení, při skutečné velikosti a orientaci defektu, úrovni a orientaci napětí, při reálném stavu materiálu, teplotních pnutích, působení média. Metoda AE zároveň s přítomností defektu detekuje též přítomnost podmínek pro jeho rozvoj.

Metoda AE poskytuje unikátní možnost monitorování, kontroly, inspekce konstrukce též za provozu - obvykle v režimu střídání monitorování různých konstrukcí či oblastí téže konstrukce - tzn. kontrolu bez nutnosti odstavení konstrukce z provozu až po možnost trvalého provozního monitorování vybraných uzlů konstrukcí.

Výše uvedený princip jevu a metody Akustické emise a z něj vyplývající aplikační potenciál způsobil na přelomu 60 a 70-tých let - po prvních úspěšných aplikacích velká očekávání.

Současně se však objevili neúspěšné aplikace metody AE především dvou typů :

- nebyl detekován závažný defekt v konstrukci (přesto, že byl přítomen)
- byla vydána falešná hlášení o závažném defektu (přesto, že nebyl přítomen)

tzn. **na jedné straně významný aplikační potenciál metody AE
na druhé straně zvýšený stupeň nejistoty hodnocení výsledků**

Cílem tohoto příspěvku je stručně diskutovat otázku, jak je to s možností spolehnout se na závěry vyhodnocení měření AE. V této souvislosti též ukážeme kroky vedoucí ke snížení stupně nejistoty vyhodnocení výsledků měření AE a k implementaci těchto kroků do praxe.

Současně chceme tímto příspěvkem prezentovat práce,

jež v rámci sdružení ACES a CDM ÚT AV ČR provádíme, a jejichž cílem je vývoj a tvorba spolehlivých a exaktně podložených procedur a metodik aplikací metody AE v praxi.

3.Stručné poznámky k obecnému schématu hodnocení naměřené AE.

3.1 Poznámky ke stávajícím standardům AE.

Rozdělme úlohu konkrétní aplikace metody AE na čtyři dílčí úlohy :

- A) Technika a metodika měření Akustické emise
- B) Záměr a podloženost konkrétní metodiky a režimu nasazení AE
- C) Kritéria hodnocení závažnosti naměřené akustické emise a jejich spolehlivost
- D) Výsledná forma zhodnocení výsledků a závěrů z naměřené AE

Stávající standardy akustické emise ASME, ASTM, EN [1,2,3,5,6,7,] se ke konkrétní metodice nasazení a vyhodnocení, tzn.k bodům B) a C) nevyjadřují. Soustředí se především na otázku A) - jak správně provádět měření AE - tzn.na techniku měření a nikoliv na oprávněnost/smysluplnost dané aplikace, její efektivnost a spolehlivost. Konkrétní metodiky aplikací AE jsou v konkrétních případech (na konkrétních konstrukcích) obvykle licencované, např.MONPAC, metodika měření a hodnocení zásobníků LPG apod... Nicméně ať již se jedná o obecné normativy či licencované procedury, shodují se obojí ve výsledné formě hodnocení naměřené AE (bod D), a to ve formě klasifikace výsledků do tříd závažnosti (počet tříd od tří do pěti). Závažnost třídy ovšem určuje závažnost následných kroků, nikoliv závažnost příznaků detekované AE. Přiřazení vyplývající z příznaků naměřené AE obecné normativy neurčují. Jedná se typicky o tyto třídy závažnosti :

nezávažná aktivita => zaznamenání aktivity AE pro srovnání při dalších měřeních, případná vizuální kontrola či stručné posouzení možného původu dané aktivity AE

potencialně závažná aktivita => detailní analýza naměřených dat AE a doporučení doplňkové NDT kontroly lokality detekované aktivity AE

závažná aktivita => požadavek doplňkové NDT kontroly lokality v nejbližším vhodném termínu

kriticky závažná aktivita => požadavek na doplňkovou NDT kontrolu - bez této kontroly nelze nadále konstrukci provozovat - v případě provozního měření představuje tato klasifikace požadavek na odstavení z provozu do doby doplňkové NDT kontroly

Tzn.normy standardně řeší otázku techniky měření AE, požadavky na protokol popisující měření, kalibraci, test lokalizace....tzn.bod A) viz.výše. Dále určují formu výsledku zkoušky v podobě klasifikace závažnosti lokality detekované aktivity AE s tím, že závažnost definují závažností a naléhavostí následných kroků (doporučení, požadavky) bod D) viz.výše. Otázkám bodů B) a C), tzn.záměru, podloženosti, metodice hodnocení příznaků závažnosti AE se normy nevěnují.

Skutečnost, že normy obecně nepostihují konkrétní metodiku aplikací AE* je pochopitelná. Specifika každé konkrétní aplikace jsou v případě metody AE natolik výrazná a odlišná případ od případu, že unifikaci metodiky aplikace AE* lze provést skutečně velmi obtížně.

*Pozn. *: Metodikou aplikace AE miníme otázky typu, pro které konstrukce a v jakém režimu nasazení je metoda AE spolehlivým efektivním prostředkem kontroly-inspekce tlakových nádob resp. potrubí.*

3.2 Poznámky k otázce oprávněnosti/zpochybnění aplikace metody AE.

Vyjděme ze tří otázek - situací a jejich kombinací, jež mohou nastat :

- | | | |
|---|-----|----|
| 1) Závažný defekt je konstrukci přítomen | ANO | NE |
| 2) Závažný defekt je zdrojem detekovatelné AE | ANO | NE |
| 3) Pracovník vyhodnotí správně přítomnost závažného defektu | ANO | NE |

Existující kombinace odpovědí na otázky 1),2) až 3), např. AAN = ANO,ANO,NE

AAA : závažný defekt existuje, je detekovatelný, je detekován a jako závažný vyhodnocen

AAN : závažný defekt je přítomen a je detekovatelný, chybným měřením či vyhodnocením je opomenut-přehlédnut-či podceněna jeho závažnost

AN- : závažný defekt je přítomen, ale není jako závažný detekovatelný

N-A : falešné hlášení přítomnosti neexistujícího závažného defektu

N-N : závažný defekt nepřítomen, hlášení o přítomnosti závažného defektu nevydáno

Od správné aplikace metody AE očekáváme situaci - resp.kombinaci :

AAA : závažný defekt existuje, je detekovatelný, je detekován a jako závažný vyhodnocen

N-N : závažný defekt nepřítomen, hlášení o přítomnosti závažného defektu nevydáno

Situace-kombinace *AAN* a *N-A* představují chybné měření resp.vyhodnocení naměření AE.

Situace *AN-* : představuje chybnou metodiku nasazení AE

Dle našich zkušeností považujeme za nejzávažnější zdroj nejistoty aplikace metody AE právě uvedenou situaci *AN-* , tzn.situaci, kdy nemůžeme konstatovat, že nepřítomnost závažné aktivity AE znamená též nepřítomnost závažného defektu.

Jedná se o otázku prioritní, neboť nejsou-li splněny podmínky pro tvrzení :

„bude-li v konstrukci přítomen závažný defekt => pak bude detekován a jako závažný nalezen a vyhodnocen“,

pak je nasazení metody AE zpochybněno. Porovnejme předchozí tvrzení s tvrzením :

„bude-li v konstrukci přítomen závažný defekt a bude-li detekovatelný a bude-li vykazovat příznaky závažného defektu => pak bude jako závažný detekován a vyhodnocen“

Naopak, jsou-li podmínky pro výše uvedené tvrzení oprávněnosti nasazení metody AE splněny, tzn. „bude-li v konstrukci přítomen závažný defekt, pak bude detekován a jako závažný nalezen a vyhodnocen“, *pak* není důvod proč plně nevyužít všech předností a aplikačního potenciálu, jež metoda AE poskytuje.

Nadto, pokud platí výše uvedené tvrzení, *pak* též platí, že pravděpodobnost záměny aktivity defektu s aktivitou rušivou je nízká. Platí totiž, že příznaky závažného defektu bývají specifické právě pro závažný defekt a s typickým zdrojem rušivým jsou zaměnitelné pouze s malou pravděpodobností.

Nadto naše zkušenosti ukazují, že pokud už určitou aktivitu AE detekujeme a jsme na vážkách, zda se jedná o aktivitu rušivou či závažnou, lze důkladnou analýzou naměřených dat a dalších okolností měření původ detekované AE upřesnit, tzn. o rušivosti či závažnosti aktivity adekvátně rozhodnout.

Tzn. problém možnosti chybného varovného hlášení považujeme za méně závažnou a nepovažujeme ji za zpochybnění oprávněnosti a efektivnosti aplikace metody akustické emise.

3.3 Poznámky k základním typům-režimům zkoušek AE a jejich ekonomickému přínosu

Základní typy zkoušek metody AE jsou

- 1) výrobní a povýrobní zkoušky AE nových tlakových nádob a potrubí
- 2) periodické provozní zkoušky - včetně tlakových zkoušek
- 3) trvalé provozní monitorování vybraných uzlů konstrukcí
- 4) rekvalifikační zkoušky konstrukcí při prodloužení životnosti, změně provozních parametrů....

K tomu dodejme, že [1,2,3,4,8] :

- a) Na celkovém počtu všech zkoušek ocelových tlakových nádob, zásobníků, potrubí se v chemickém průmyslu podílejí periodické provozní zkoušky (bod 2) více než 95%.
- b) Naprostá většina těchto zkoušek se neprovádí drahými-špičkovými-specializovanými systémy AE v cenách od 5000 dolarů na měřicí kanál výše, ale standardními systémy v cenové relaci kolem 1000 dolarů na měřicí kanál. Nadto při dostatečně velkém počtu zkoušek se náklady jedné zkoušky (8 až 32 kanálů) mohou snížit až na úroveň až 500-1000 dolarů na zkoušku.
- c) V naprosté většině těchto zkoušek AE se nepožaduje, aby metoda AE přesně charakterizovala typ porušení či typ defektu - zdroje AE, ale požaduje se spolehlivé hlášení, detekce a základní vyhodnocení akustické aktivity jako podklad pro další kroky
(Pozn: mezi tyto kroky zařadíme případně nasazení špičkových systémů AE - ovšem v tomto případě též se špičkovým software a obsluhou schopnou správně vyhodnotit velké objemy naměřených dat).

Tzn.v převážné většině aplikací není prioritní, jak precizně a spolehlivě vyhodnotíme detailní původ naměřené aktivity AE (což může být sice též důležité, ale není to prioritní).

Prioritní je, aby metoda AE v rámci dané aplikace spolehlivě a včas detekovala výskyt/rozvoj závažnějšího defektu a poskytla o rozvoji defektu varovné hlášení.

Pak lze, jak je to aplikováno v USA např.prodloužit periodu odstávek/NDT inspekcí, resp. se v rámci NDT inspekcí zaměřit pouze na vybrané lokality [1,2,3,4]. Nicméně je zde podmínka, že závažný defekt bude skutečně spolehlivě detekován a vyhodnocen („nepřeslechnut“).

Výše uvedené údaje dle našeho názoru přesvědčivě ukazují, že aplikace metody AE mohou být za výše uvedených předpokladů finančně přínosné a efektivní.

Tyto předpoklady jsou :

- 1) pro danou aplikaci je na dané konstrukci oprávněné a podložené tvrzení :
*„bude-li v konstrukci přítomen závažný defekt =>
pak bude detekován a jako závažný nalezen a vyhodnocen“* ,
- 2) zkoušky jsou prováděny pravidelně periodicky s minimálními náklady, jež současně splňují požadavek tvrzení bodu 1) - počet zkoušek zlevňuje náklady na jednu zkoušku
- 3) vybrané konkrétní procedury aplikací AE musí být příslušnými orgány akceptovány jako plnohodnotná zkouška provozuschopnosti konstrukce rovnocenná jiným NDT metodám či tlakové zkoušce

3.4 Co je cílem naší práce ?

Vytvořit exaktní podklady pro tvorbu konkrétních podložených procedur aplikací metody AE, jež budou schopny prokázat pro danou konkrétní aplikaci platnost tvrzení :

***„bude-li v konstrukci přítomen závažný defekt =>
pak bude detekován a jako závažný nalezen a vyhodnocen“***

4. Detekovatelnost zdrojů AE

Z předchozí kapitoly je zřejmé, že jednou z nejdůležitějších otázek aplikací metody AE je detekovatelnost procesů - aktivity defektů v konstrukcích.

Při plastické deformaci či rozvoji porušení oceli probíhá celá řada dynamických poskoků defektů - pohyb dislokací, lom/dekoheze nekovových složek struktury, iniciace mikrotrhlin, růst trhlin - tzn. všechny tyto procesy generují akustickou emisi - ovšem ne všechny tyto procesy generují akustickou emisi detekovatelnou v laboratorních natož v průmyslových podmínkách [8,15].

Faktory ovlivňující detekovatelnost AE v průmyslových aplikacích

- 1) Síla zdroje - počáteční intenzita vyzářené AE ze zdroje
- 2) Vývoj intenzity akustických vln/akustické emise se vzdáleností od zdroje
- 3) Citlivost akustické vazby a snímačů AE
- 4) Úroveň rušivého akustického pozadí

Bod 3) zjistíme absolutní kalibraci akustické vazby - snímače AE instalovaného na povrchu. Metodika, jak vytvořit ze standardní kalibrace PEN-Testem kalibraci absolutní je v rámci sdružení ACES a CDM ÚT AV ČR rozpracována do fáze aplikací [14].

Bod 4) zjistíme oměřením rušivé aktivity AE či elektického pozadí na jednotlivých kanálech instalovaných na konstrukci. Body 3 a 4 představují standardní kroky při každém měření AE.

Úlohami, jimž je nutno v této fázi věnovat pozornost jsou body 1) a 2).

4.1 Síla zdroje - počáteční intenzita vyzářené AE ze zdroje

Z prací prováděných v 80-tých [8,9,10,15] letech se jeví jako nejnázornější představa síly zdroje dynamicky expandujícího objemu materiálu. Uved'mě příklady :

- při dynamickém poskoku dislokace o plochu ΔS je tímto objemem $b\Delta S$, kde b reprezentuje Burgersův vektor dislokace
- při vzniku kruhové mikrotrhliny se jedná o objem vzniklé mikrotrhliny $b\Delta S$, kde ΔS je plocha mikrotrhliny a b průměrná výška rozevření mikrotrhliny
- při mikroposkoku na čele makrotrhliny se jedná o $b\Delta S$, kde ΔS je plocha poskoku a b průměrný přírůstek rozevření trhliny v lokalitě pokoku na čele trhliny

Jedná se o aproximaci podobnou ekvivalentní velikosti vady známou z měření ultrazvukem. Tzn. nejedná se o přesné určení dynamicky expandujícího objemu, ale o fyzikálně názorné, exaktně podložené vyjádření vyzářovací síly-intenzity zdroje AE.

Úlohou číslo 1 je určit z proměření intenzity akustických vln v nejbližším okolí zdroje sílu zdroje - tzn. ekvivalentní expandující objem. To realizujeme porovnáním výpočtů a experimentu :

výpočtů rozvoje akustických vln (dynamické) napjatosti v nejbližším okolí modelového zdroje

- v tenké desce oboustraně obklopené plynem, resp. jednostraně obklopené kapalinou
- v tlusté desce se zdrojem na vnějším povrchu, uvnitř desky, či na vnitřním povrchu, kdy na vnitřním povrchu počítáme s plynem resp. kapalinou
- v malém laboratorním zkušebním tělese

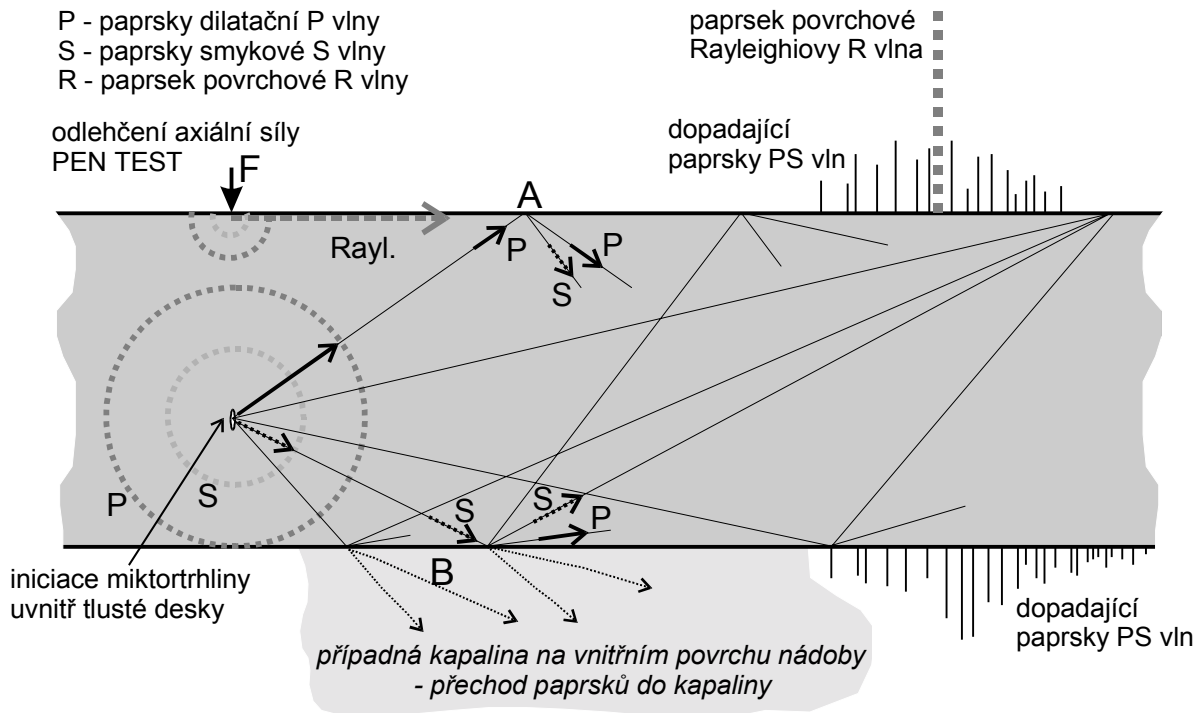
experimentů - proměření akustického pole v blízkém akustickém poli modelových zdrojů AE

Zvláštní význam přitom klademe na výpočet a experimenty pro malá laboratorní zkušební tělesa.

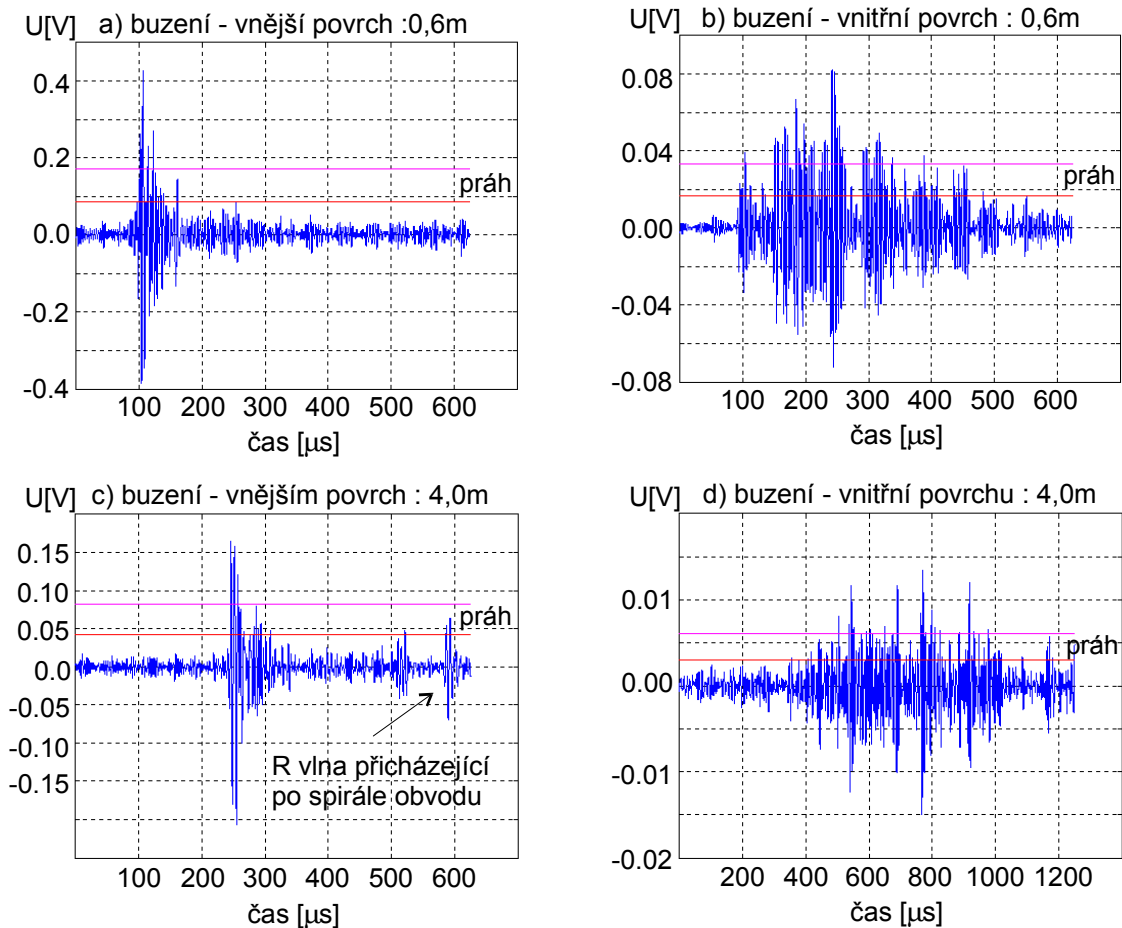
Důvodem je záměr vytvořit metodiku, jež by při laboratorních zatěžovacích zkouškách materiálu umožnila z proměření akustické emise určit vyzářovací sílu zdrojů působících při daném procesu vyvolaném zatížením materiálu vzorku. Tzn. vytvoření metodiky

určení ekvivalentní vyzářovací síly zdrojů při zatěžovacích zkouškách laboratorních těles

Obr.2: Prezentace rozdílu detekovaného signálu AE buzeného na vnitřní/vnější straně stěny nádoby
 Při buzení na vnější stěně jsou signály 5x až 10x silnější, bez disperze, s přesnou Δt lokalizací



Příklady detekovaného signálu AE buzeného Pen Testem na vnějším povrchu nádoby ve vzdálenosti 0,6m (a) a 4,0m (c) a jejich porovnání s detekcí signálů AE buzených na vnitřním povrchu ve vzdálenosti 0,6m (b) a 4,0m(d)



4.2 Vývoj intenzity akustických vln/akustické emise se vzdáleností od zdroje

Na úlohu 1) tzn. určení síly-intenzity zdroje AE z intenzity akustického pole bezprostředně po vyzáření ze zdroje návazuje úloha 2), tzn. šíření těchto počátečních vln konstrukcí k místům jejich detekce, k místům instalace snímačů či vlnovodů akustické emise.

Tato problematika je v současné době nejvíce podceněna co do významu pro metodiku AE. Podcenění této otázky je dle našeho názoru jedním ze dvou nejsilnějších faktorů, jež mohou vést k chybné metodice nasazení či vyhodnocení AE v aplikační praxi. Podcenění této problematiky je dáno evidentně tím, že se jedná o skutečně složitou problematiku. Nicméně složitost této problematiky nemůže být důvodem pro její „odsouvání na vedlejší kolej“. Bez jejího řešení nelze metodu AE postavit na skutečně exaktní základ. Z úlohy šíření vln v tělese plynou zásadní dopady do řady významných otázek AE jako jsou **detekovatelnost, lokalizace zdrojů, rozmístění snímačů na konstrukci, hodnocení parametrů naměřeného signálu AE, apod...**[8,11,14,15]

Pozn: Složitost přístupu spočívá v tom, že AE reprezentuje nestacionární přechodové vybudění nejrůznějších módů šíření vlnění v širokém frekvenčním spektru. To je zásadní rozdíl např. proti ultrazvukové defektoskopii, kdy vybudíme ultrazvukové vlny jednoho zvoleného módu a frekvence a sledujeme odezvu pouze v blízkém poli okolí sondy (paprsková reprezentace). Podobně např. v případě waveguided ultrasonics vybudíme pouze jeden typ známe vlny (např. 1. Lambova symetrická) a porušení vyhodnocujeme jako změny na jedné disperzní křivce této vlny - závislost rychlosti této vlny na frekvenci.

Jako doklad výše uvedených tvrzení uveďme **ve velmi zjednodušené formě** jeden konkrétní příklad, který reprezentuje silnostěnné tlakové nádoby naplněné plynem - např. reaktor čpavku v Duslo Šala, reaktory hydrocracku v Slovnaft Bratislava, ... na nichž jsme prováděli měření a vyhodnocení AE [14], schématicky viz. obr.2.

Pokud ve shodě s normami testujeme šíření vlnění pomocí Pen Testu na vnějším přístupném povrchu nádoby - tzn. konkrétně útlum se vzdáleností, resp. testy přesnosti lokalizace, změny tvaru signálu se vzdáleností..., pak vybudíme jako dominantní Rayleighovu R povrchovou vlnu, tzn. detekujeme dominantně odezvu této vlny, obr.2. Ostatní módy jsou výrazně slabší. R vlna má velmi nízký pokles intenzity se vzdáleností, minimální rozplývání signálu (signál zůstává ostrý), ostrost signálu s jednou neměnnou rychlostí šíření vlnění poskytují přesné výsledky testu lokalizace.

Pokud však působí defekt ve středu stěny či na vnitřním povrchu nádoby, tato vlna se vůbec nevybudí. Tzn. při testech šíření na vnějším přístupném povrchu testujeme vlnu, jež se v případě aktivity defektu ve stěně konstrukce vůbec nevybudí. Vlnění, jež se v tomto případě vybudí je dáno superpozicí primárních, odražených a rozpadlých paprsků P a S vln vyzářených ze zdroje, obr.2. Tato superpozice vln vytváří signál, jehož intenzita klesá se vzdáleností od zdroje podstatně rychleji než u R vlny, signál se roplývá do délky, náběžná hrana není ostrá, což vede k zvýšení nepřesnosti lokalizace...

Tento zjednodušený příklad je zástupcem řady podobných případů a ukazuje názorně, jak snadno se můžeme dopustit naprosto klíčové chyby, a to i tehdy, postupujeme-li ve shodě se stávajícími normami AE... Mohli bychom uvést celou řadu dalších konkrétních příkladů, kdy nejen v ČR, ale kdy se celosvětově aplikují určité postupy, které vycházejí z ne zcela správných předpokladů a představ o rozvoji dynamické napjatosti (šíření akustických vln) vybuděných ze zdroje AE.

Na konferenci budou pro zájemce připraveny ukázky matematických modelů vývoje signálu AE od zdroje ke snímači pro vybrané typy geometrií/konstrukcí ve formě animace časového vývoje odpovídajících signálů. Cílem těchto velmi náročných prací, které v rámci sdružení ACES a CDM UT AV ČR provádíme, je postupně zahrnout do aplikačních procedur důsledky analýzy šíření signálu AE v konkrétních typech konstrukcí tak, aby podobné nesrovnalosti nemohly vést k chybným výsledkům a závěrům měření AE v průmyslové praxi.

5. Příznaky závažnosti detekované AE vzhledem k aktivitě defektů.

V rámci více než třicetileté praxe aplikací metody AE došlo k významnému vývoji názorů na příznaky, jež ukazují na přítomnost závažné aktivity AE. V současné době je známa soustava příznaků, jejichž kombinace je typická pro aktivitu závažného defektu a naopak není charakteristická pro typické rušivé zdroje AE, s nimiž se v praxi setkáváme. Jedná se o [1,2,3,15]:

- setrvačné doznívání aktivity AE v prodlevách zatížení (po předchozím nárůstu zatížení)
- výskyt signálu vysoké intenzity při vyšších úrovních zatěžovacího stimulu
- rostoucí aktivita AE s růstem zatěžovacího stimulu
- Felicity jev vers. Kaiserův jev - viz.dále 5.2
- celková úroveň aktivity AE

Ovšem i v tomto případě platí, že automatická rutinní aplikace těchto kritérií může vést k chybným závěrům. I v tomto případě by měl specialista AE řádně promyslet s jakým typem defektů či mechanismem porušení se můžeme v dané konstrukci setkat, jaké zdroje AE s jakými příznaky lze v konkrétní aplikaci očekávat. Důležitá je předchozí historie zatížení konstrukce...platí zde, že neexistují jednoduchá obecná schémata hodnocení závažnosti aktivity defektů...

Opět podobně jako v předchozí kapitole doložíme toto tvrzení na konkrétních případech.

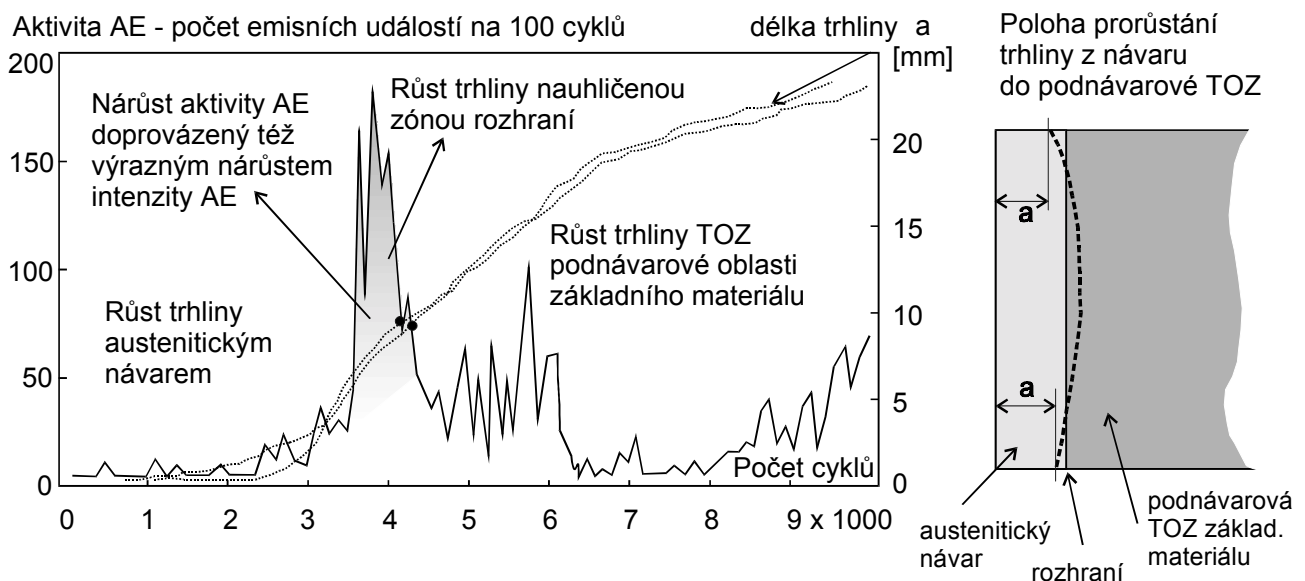
Tyto příklady ukazují

- jaké významné informace může metoda AE poskytnout
- jak ošidná může být automatická aplikace kritérií závažnosti detekované AE

5.1 Nehomogenita - strukturně slabá místa materiálu.

K rozvoji porušení typických ocelových tlakových nádob a konstrukcí dochází obvykle v lokálně strukturně slabých místech materiálu - nejčastěji svary, segregace, vycezeniny. Ale i v případech, kdy se materiál jeví jako homogenní ukazují měření AE na jeho nehomogenitu a přítomnost slabých míst. Jedním z nejnázornějších kritérií rozvoje defektu je urychlující se nárůst aktivity AE při růstu trhliny únavovým mechanismem, či korozním praskáním. V těchto případech s časem-růstem trhliny roste aktivita AE s výrazně se urychlujícím nárůstem. Tento projev se ovšem v případě růstu v nehomogenní struktuře materiálu může zcela narušit. Příklad uvádí obr.3, [13] a následný text.

Obr.3: Aktivita AE detekovaná v průběhu únavového růstu trhliny v nehomogenním materiálu.



Uvedme příklad z růstu trhliny únavovým mechanismem z austenitického návaru, přes rozhraní do podnávarové TOZ. Postup trhliny - délku **a** s celkovým počtem cyklů vidíme na obr.3. Současně vidíme detekovanou aktivitu AE odpovídající růstu trhliny. Aktivita růstu v austenitu je velmi nízká. V okamžiku prorůstání trhliny rozhraním výrazně roste aktivita i intenzita detekovaných událostí AE. V oblasti TOZ se střídají úseky vysoké a nízké aktivity AE. Teprve v závěru zkoušky vidíme počátek rovnoměrnějšího nárůstu aktivity AE. Co nám tento výsledek říká ?

- za první, že porušení tvrdé nauhličené vrstvičky rozhraní návar-základní materiál je velmi spolehlivým a citlivým indikátorem i malých pohybů defektů v oblasti rozhraní.

- za druhé, že růst trhliny strukturně nehomogenní oblastí (podnávarová TOZ) může výrazně narušit kritéria odvozená z trendu aktivity AE b) (ale též c) - náhlý výskyt intenzivních signálů z rozhraní).

5.2 Rozvoj porušení zkušebního tělesa z technologického vrubu.

Příklad odpovídá velkorozměrnému zkušebnímu tělesu, kde k porušení došlo z technologického vrubu - povrchový nežíhaný návar velikosti do 1cm - („řuknutí svářečkou“). UZ kontroly nenalezly v lokalitě návaru významnější defekt. Následně byly realizovány dva zatěžovací cykly, viz.obr.4. Šedá tečkovaná linie uvádí časový průběh zatížení tělesa - měřítko síly je poměr k síle lomu tělesa jež má hodnotu 1,0. Černá rostoucí schodovitá linie zobrazuje sumu detekovaných událostí z místa technologického vrubu. Posudmě závěry vyplývající z tohoto měření, viz.obr.4 :

- za první vidíme, že k detekci prvních událostí AE v místě vrubu začalo docházet při síle cca 0,4 síly lomu tělesa, od této síly výše aktivita AE již neutichá

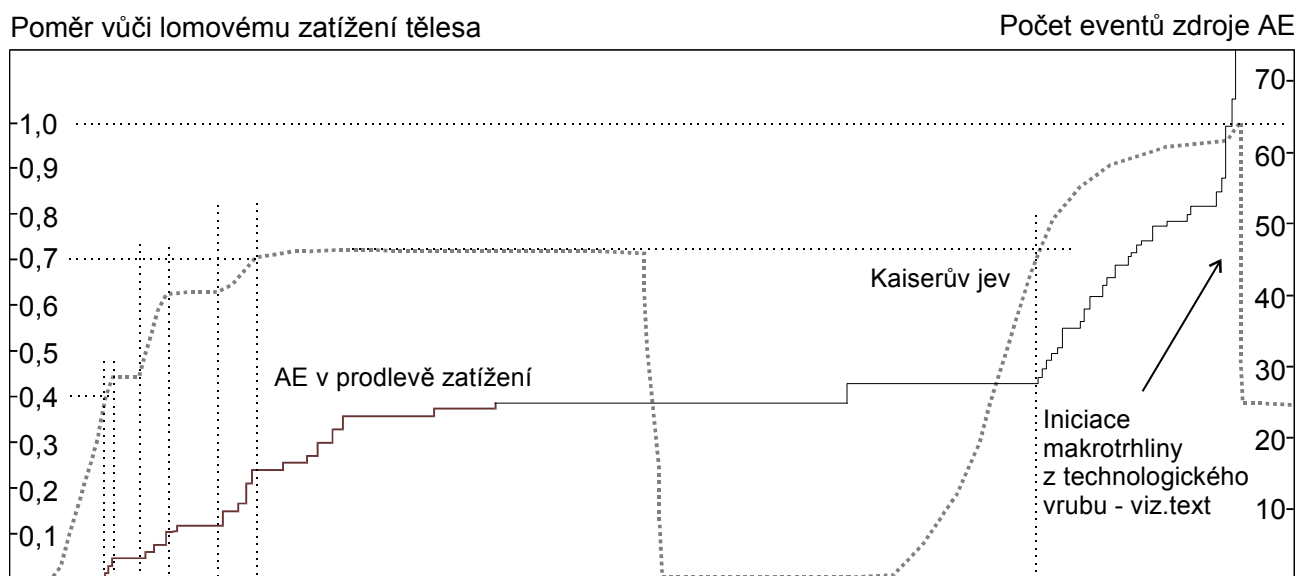
- za druhé výraznější nárůst aktivity doprovázený detekcí AE též v prodlevě zatížení, tzn. k detekci příznaků závažnějšího defektu dochází cca při 0,7 síly porušení tělesa

- za třetí lze detekovat Kaiserův jev - tzn.v druhém cyklu dochází k detekce AE teprve po překročení maxima zatížení v prvním cyklu - Felicity jev - počátek aktivity při silách částečně pod maximem zatížení v předchozím cyklu není přítomen

- za čtvrté v závěrečné fázi aktivita AE z technologického vrubu již trvale narůstá až do prasknutí-iniciace makrotrhliny, iniciací makrotrhliny dochází k poklesu síly a trhlina se v materiálu zastavuje

- za páté k iniciaci rozvoje makrotrhliny z technologického vrubu dochází při síle, při které bychom očekávali lom teprve při přítomnosti významné makrotrhliny v tělese

Obr.4: Rozvoj aktivity AE při zatěžovací zkoušce tělesa s technologickým vrubem svaru.



Z výše uvedených bodů plyne, že detekce přítomnosti slabého místa byla možná již od 0,4 síly iniciace makrotrhliny. K detekci příznaků závažného defektu došlo přibližně při síle 0,7 síly lomu tělesa. Jak ukazují výsledky publikované v [12], k detekci příznaků závažné aktivity dochází při jednorázovém zatěžování tlusté desky s makrotrhlinou různé velikosti též při cca 0,7 síly při lomu. AE detekovala závažnost lokality přesto, že se v lokalitě nevyskytovala významnější trhlinka detekovatelná standardními NDT kontrolami. V těchto případech lze tedy konstatovat, že příznaky závažné aktivity AE jsou přítomny cca od 0,7 síly lomu tělesa nezávisle na tom, zda je lom iniciován z makrotrhliny či z technologicky slabého místa. Příznaky závažné AE ukazují na skutečnost, že materiál v dané lokalitě začíná ztrácet schopnost „udržet“ zatížení nezávisle na přítomnosti makrotrhliny či strukturně slabého místa - či v jejich kombinaci. To je významný signál pro aplikaci metody AE při tlakových zkouškách...(v konkrétních případech tato informace hovoří pro nasazení metody AE, v jiných případech proti).

5.3 Metodické závěry.

Výše uvedené dva příklady ukazují opět na skutečnost, že přes jednoduchost a názornost principu metody AE, představuje metoda komplexní problém. Ukazují i na skutečnost, že ke každé konkrétní aplikaci (či skupině aplikací) je nutno přistupovat individuálně se započtením celého souboru skutečností, které nakonec ovlivní výslednou opodstatněnost, spolehlivost a efektivnost nasazení metody AE. Příklady zdůrazňují velký význam nejen přítomnosti a velikosti defektu ale též stavu materiálu, přítomnost slabých míst struktury materiálu... tzn. významnou citlivost metody AE nejen k přítomnosti defektu ale též ke stavu materiálu a slabých míst struktury materiálu.

Je nutno rozpravovat metodiku laboratorních zkoušek těles, která by nám umožnila lépe popsat projevy akustické emise při zatěžování konkrétního materiálu s koncentratory napětí či defekty. Existují minimálně dva důvody těchto zkoušek.

Za prvé je to otázka detekovatelnosti mechanismů zdrojů AE. viz.4.1. Podmínka detekovatelnosti procesů, jež mají být monitorovány, představuje nutný elementární požadavek, má-li mít nasazení metody AE vůbec smysl.

Za druhé je to otázka příznaků stupně závažnosti detekované AE, na jejichž základě jsou, resp. mohou být vyvozeny výsledné závěry a doporučení z vyhodnocení naměřené AE.

Obecně platí, že zvýšení exaktnosti a teoretického základu pro nasazení a vyhodnocení výsledků AE zvyšuje hodnotu, spolehlivost a důvěryhodnost závěrů vyvozených z naměřených výsledků zkoušky či monitorování AE.

Význam těchto zkoušek je zdůrazněn zřejmým faktem, že nelze provádět destruktivní či semidestruktivní zkoušky skutečných konstrukcí, přičemž teprve (semi)destruktivní zkoušky těles/materiálu jsou schopny v konkrétních případech doložit opodstatněnost aplikace metody AE.

6. Závěr

Pro plné využití aplikačního potenciálu metody AE je nutno snížit stupeň nejistoty hodnocení výsledků měření AE. Je nutno, abychom byly schopni doložit oprávněnost, přínos a efektivnost průmyslových aplikací metody AE. Cílem našich prací je vytvořit exaktní podklady pro to, aby při zvažování konkrétní aplikace AE bylo k dispozici dostatek podložených informací pro rozhodnutí o správné konkrétní metodice nasazení AE, o oprávněnosti nasazení metody AE, i o zařazení výsledků aplikace do celkového schématu hodnocení bezpečnosti, spolehlivosti, přípustnosti provozu konkrétní konstrukce či jejího uzlu... v příspěvku byly konkrétně popsány úlohy :

- detekovatelnost zdroje - kvantifikace síly zdroje AE
- šíření dynamické napjatosti - AE tělesem ze zdroje k místu detekce
- laboratorní zatěžovací zkoušky těles s defekty pro doložení oprávněnosti aplikací AE

Význam těchto prací zdůrazňuje též následující skutečnost. Aplikační hodnotu AE pro provozovatele ovlivňuje též skutečnost, jakou oporu mu pro rozhodování o provozuschopnosti konstrukce výsledky metody AE poskytují. Zda jsou výsledky měření AE uznány příslušnými orgány ITI jako výsledky opravňující provozovatele rozhodnout o provozuschopnosti konkrétní konstrukce (prozatím samozřejmě ne obecně - ale v určitých konkrétních případech). Pokud budeme chtít obhájit oprávněnost určitých aplikačních procedur, budeme povinni doložit a obhájit tuto oprávněnost exaktně podloženými fakty. I k tomu slouží práce, na nichž v současné době v rámci sdružení ACES a CDM ÚT AV ČR pracujeme.

*Závěrem je naší milou povinností vyjádřit poděkování za podporu projektu
Czech Ministry of Education, Project No MSM 2309000009*

7.Literatura

- [1] Fowler T.J.: *Recent Development in Acoustic Emission testing of Chemical Process Equipment*, Progress in Acoust.Emiss.IV, Kobe, The Japanese Society of NDT - November 1988
- [2] Fowler T.J.: *Application of Acoustic Emission in Chemical Industry*, Material Evaluatin Vol.50, No.6 str.875-882
- [3] Fowler T.J.: *Acoustic Emission Testing of Vessels*, Chemical Engineering Progress September 1988, str.59-70
- [4] Vahaviolos S.J., Pollock A., Lew N.: *Pinpoint Structural Defects with Acoustic Emission*, Chemical Engeneering Progress, Janury 1991, str.: 60-66
- [5] ASME Code Section V, Article 12 - *Acoustic Emission Examination of Metallic Vessels During Pressure Testing*,
- [6] ASTM E 569-85 - *Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring of Structures During Controlled Stimulation*
- [7] *Acoustic Emission examination during proof testing* - připravovaná evropská EN norma
- [8] NDT Handbook, Vol.5, Acoustic Emission - ASNT 1988
- [9] Wadley H.N.G., Scruby C.B.: *Elastic wave radiation from cleavage crack extension*, Int.Jour.of Fracture Vol.19 (1983)str.111-128
- [10] Scruby C.B., Baldwin G.R., Stacey K.A.: *Characterisation of fatigue crack extension by quantitative acoustic emission*, Int.Jour.of Fracture, Vol.28 (1985) str.201-222
- [11] Eisenblatter J., Erlenkamoer S., Jax P., Votava E.: *The Influence of Wave Propagation on the Accuracy of Locating Acoustic Emisssion Sources in Thick-Waled and Thin-walled Structures*, 3rd Int.Conference on NDt Evaluation in the Nuclear Industry, Febr.1980, Salt Lake City USA
- [12] Příbáň M., Sláma K., Štěpánek S.: *Výsledky měření AE při tahových zkouškách velkorozměrných vzorků s vruby*, Kovové materiály, Vol.27, No.2, str.240-252
- [13] Příbáň M, Bláha J., Kravčenko A.: *Der einfluss der Kleinene auf die Chracteristik der Shallemission wahrend der Belastungprufung for Reaktorstahlen*, 8.Kolloquium AE, Zittau 1990, str.12-17
- [14] Příbáň.M: *Tlakové nádoby Reaktoru čpavku a výmeníku plyn-plyn - zpráva EFS11/95 Část B: Absolutní kalibrace měřicí trasy AE a detekovatelnosti zdrojů AE na hladké části lakových nádob*
- [15] Příbáň M: *Principy nasazení metody AE na silnostěnných tlakových nádobách* závěrečná disertační práce dokrorantského studia Plzeň 1995