



AKUSTICKÁ EMISE CYKLICKY ZATĚŽOVANÝCH LETECKÝCH KONSTRUKCÍ

ACOUSTIC EMISSION OF CYCLICAL LOADED AIRCRAFT STRUCTURES

Michal Blaháček^{*}, Jiří Skála^{}**

^{*}Ústav termomechaniky AV ČR, Praha

^{**}Výzkumný a zkušební letecký ústav, Praha

ABSTRACT

Aircraft structures fatigue failure is considerable risk of today's aviation safety. The problem is usually solved by critical parts preventive replacement, regardless of parts real state. It is very expensive and uneconomical solution. NDT method capable to find the changes in the part, that are indication of crack creation and growth, would be very useful and money saving. Acoustic emission (AE) is a NDT procedure that is candidate for the method. In the Aeronautical Research and Test Institute (VZLÚ) set of cyclical fatigue tests was done. During the tests, loaded sample AE activity was monitored, during the loading sequence pauses, the sample state was checked using NDT methods such us ultrasound, eddy current, optical methods, non-linear ultrasound, etc. Presented paper attends to description and analysis of AE measurement on cyclical loaded aircraft structure.

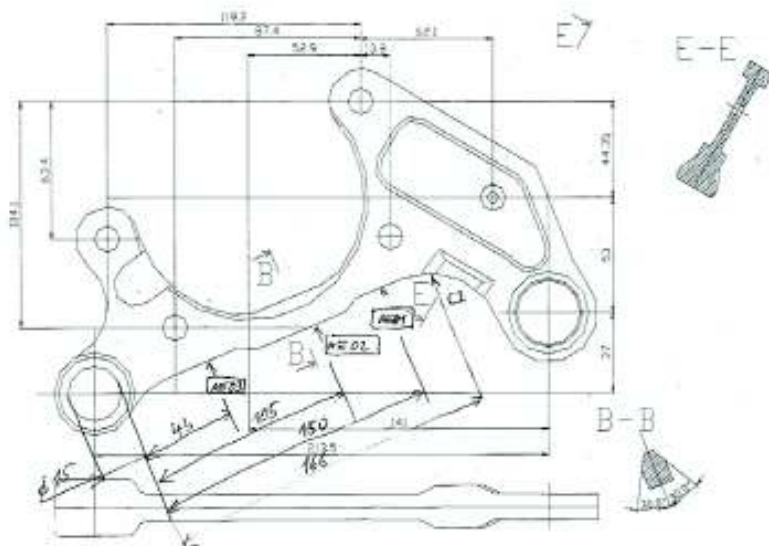
ABSTRAKT

Značné riziko pro bezpečnost současného letectví představuje únavové poškození leteckých konstrukcí. Obvykle se tento problém řeší preventivní výměnou kritických dílů, bez ohledu na jejich skutečný stav. To je ovšem dosti nákladný a neefektivní postup. Velkým přínosem by proto byla diagnostická metoda, která by dokázala detekovat prvotní změny v konstrukci vedoucí později k vytvoření trhliny (měnit součást až když je trhlina jasně patrná může být pozdě). Akustická emise je metoda nedestruktivního zkoušení, která by mohla takové informace poskytnout. Ve VZLÚ byla provedena série cyklických únavových zkoušek leteckých součástí, při nichž byla měřena emisní aktivita vzorku. Po určitém počtu zatěžovacích cyklů byl testovaný vzorek prozkoumán širokým spektrem diagnostických postupů (ultrazvuk, vířivé proudy, optické metody, nelineární ultrazvukové metody, atd.) a výsledky byly konfrontovány s měřením AE. Předkládaná práce se věnuje popisu a analýze provedených měření AE na cyklicky zatěžované letecké součásti.

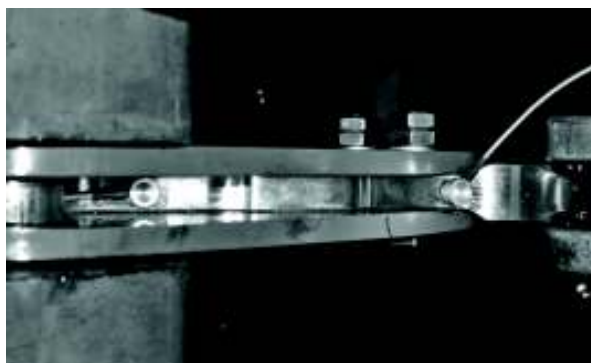
ÚVOD

V uplynulém období byla v Ústavu termomechaniky AV ČR provedena řada experimentů sledujících šíření ultrazvukových (UZ) vln v leteckých konstrukcích a mapujících možnosti různých UZ metod v nedestruktivním zkoušení leteckých konstrukcí ([1], [2], [4]). V červnu

letošního roku proběhlo dvoudenní měření akustické emise (AE) při cyklickém zatěžování součásti podvozku malého letounu - konzoly č. 3 (obr. 1). V obr. 1 jsou zakresleny tři piezoelektrické snímače AE01 – AE03 DAKEL o průměru 9 mm. Z důvodu nepřístupnosti boků vzorku během zatěžování (uchycení vzorku v zatěžovacím zařízení je vidět na obr. 2) byly tři snímače AE nalepeny na hranu součásti, takže tvoří přímkou. To omezuje lokalizaci AE zdrojů na lokalizaci lineární. Data naměřená týmem VZLÚ aparaturou DAKEL byla poskytnuta ÚT ke zpracování a vyhodnocení. Hlavním cílem experimentu bylo zachytit počáteční fázi vzniku trhliny, ideálně ještě dříve než je trhlina patrná při vizuální inspekci dílu. Kromě AE byly k dosažení cíle použity i jiné metody nedestruktivního zkoušení - ultrazvuk, vířivé proudy, nelineární spektroskopie elastických vln, atd. Hlavní výhodou AE oproti ostatním metodám je možnost kontinuálního on-line sledování, není nutné čekat na přestávku v zatěžování ani pracně demontovat vzorek ze zatěžovacího zařízení (obr. 2).



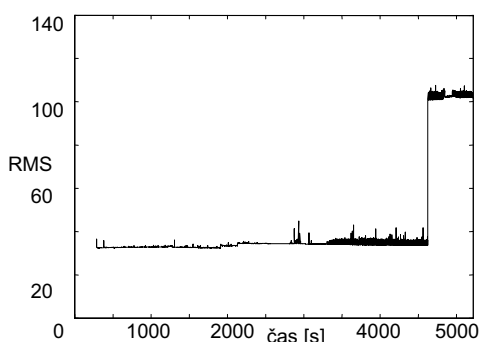
Obr. 1: Schéma zatěžované součásti s vyznačením polohy snímačů AE01 – AE03.



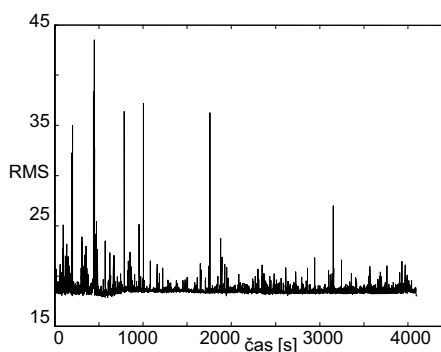
Obr. 2: Uchycení vzorku v zatěžovacím zařízení (ještě nejsou nalepeny všechny snímače AE).

PRŮBĚH EXPERIMENTU A ZAZNAMENANÁ EMISNÍ AKTIVITA VZORKU

První den měření bylo cyklické zatěžování vzorku zahájeno ve 14:04 hod. Do grafu na obr. 3 je vynesena RMS naměřená snímačem AE01, čas na ose x je v sekundách od 14:00:00 hod. Výrazné zvýšení RMS v čase $t = 4650$ s (15:17:30) je způsobeno zvýšením zesílení měřicí aparatury. Několik maxim okolo času $t = 2950$ (14:49:10) je způsobeno manipulací se vzorkem před spuštěním dalšího kola cyklování. Zvýšení emisní aktivity v čase $t = 3330$ s (14:55:30) bude dále diskutováno. Druhý den bylo cyklické zatěžování vzorku zahájeno v 13:56 hod. V grafu na obr. 4 je vynesena RMS naměřená snímačem AE01, čas na ose x je v sekundách od 14:00:00 hod. Druhý den došlo k jistému zvýšení emisní aktivity na začátku experimentu (zhruba do času 14:15) a potom na konci, v čase $t = 3500 - 4100$ s (14:58:20 – 15:08:20), což bude diskutováno níže.



Obr. 3: Emisní aktivita kanálu AE01 první den měření, čas 0 = 14:00:00 hod.



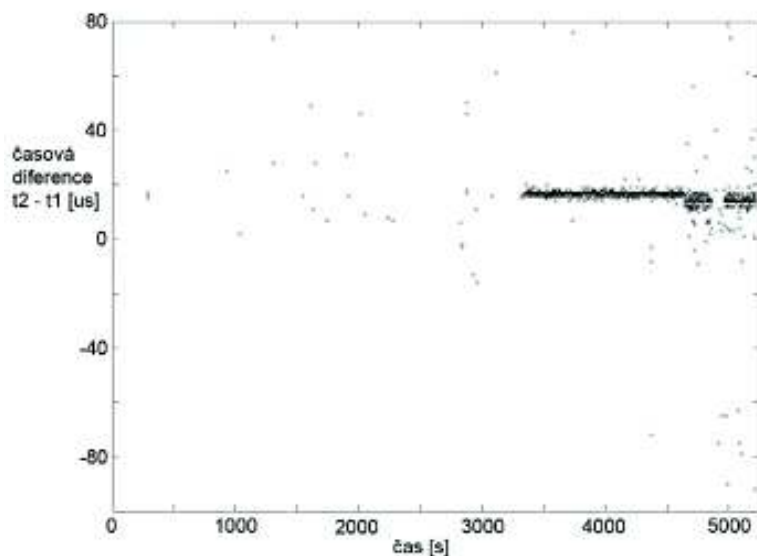
Obr. 4: Emisní aktivita kanálu AE01 druhý den měření, čas 0 = 14:00:00 hod.

Pokud se během zatěžování konzoly č. 3 objevil aktivní emisní zdroj, měly by být časové difference příchodu AE signálu k dvojicím snímačů AE přibližně konstantní pro větší počet AE událostí (malé rozdíly v řádu μs se mohou objevit jako důsledek zaznamenání AE událostí ze stejného zdroje ovšem s různou amplitudou). Rozdíly časů příchodů emisních událostí mezi kanály 1 a 2 měřicí aparatury jsou vyneseny v grafech na obr. 5 (první den měření) a na obr. 6 (druhý den měření). První den je vidět nízkou emisní aktivitu v první polovině měření, různé časové difference událostí zaznamenaných v této době svědčí o spíše nahodilé a nevýznamné emisní aktivitě. V čase $t = 3330$ s (14:55:30) nastupuje mohutná emisní aktivita při téměř konstantních differencech 16 -18 μs (aritmetický průměr je 16,8 μs). Tato aktivita časově odpovídá aktivitě zjištěné ze záznamu RMS (obr. 3), konstantní difference naznačují stále stejnou polohu AE zdroje (může se také jednat o zdroj či několik zdrojů vně řady snímačů AE01 – AE03).

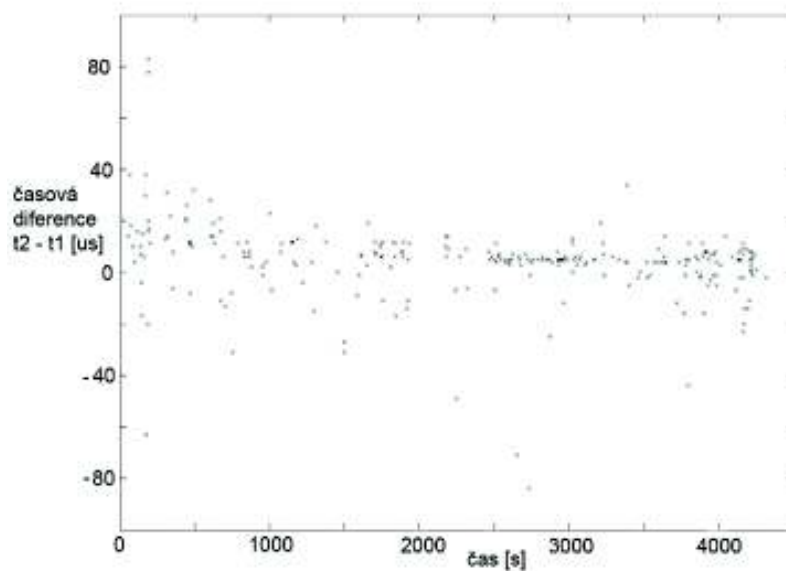
Zvýšená emisní aktivita na začátku druhého dne měření není doprovázena stejnými časovými differencemi zaznamenaných AE událostí, takže příčinou této aktivity pravděpodobně není jeden aktivní zdroj (vada). Druhá polovina zatěžování druhého dne měření jistě znaky shlukování časových differencek vykazuje, konkrétně pak v intervalu 4 – 6 μs . Nejpatrnější je to v časovém intervalu 2400 – 3000 s (14:40:00 – 14:50:00). V závěrečné fázi měření je rozptýl časových differencek vyšší, ovšem zvýšený počet událostí s differencemi v intervalu 4-6 μs je stále patrný.

ZVÝŠENÁ EMISNÍ AKTIVITA BĚHEM PRVNÍHO DNE MĚŘENÍ

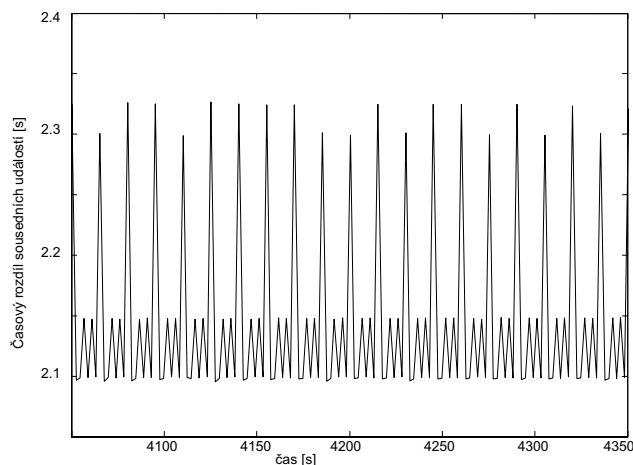
Abychom mohli analyzovat zvýšenou emisní aktivitu během prvního dne cyklování začínající v čase $t = 3330$ s, musíme zjistit zda se jedná o aktivitu periodickou. Za tím účelem jsme do grafu na obr. 7 vynesli rozdíly v časech příchodu sousedních událostí do prvního kanálu měřící aparatury.



Obr. 5: Čas. diference příchodu emisních událostí ke snímačům AE02 a AE01 1. den měření.



Obr. 6: Čas. diference příchodu emisních událostí ke snímačům AE02 a AE01 2. den měření.



Obr. 7: Rozdíly v časech příchodů sousedních událostí do prvního kanálu měřicí aparatury.

Časové rozdíly na obr. 7 se nacházejí v intervalu 2,1 – 2,35 s se střední hodnotou 2,143 s a jsou pravidelné. Příčinou takové pravidelnosti musí být cyklování vzorku, soudíme proto, že průměrná vzdálenost maxim zatížení byla 2,143 s. Pravidelné fluktuace mohou být způsobeny nedokonalostí zatěžovacího zařízení (zpětná vazba způsobuje kolísání v řádu desetin sekundy) nebo může jít o důsledek skládání periody zatěžování s periodou ukládání emisních událostí měřicí aparaturou.

Umístění trojice snímačů AE v přímce (jiné nebylo technicky možné) bohužel neumožňuje jinou než lineární lokalizaci zdrojů AE. Pro klasickou lineární lokalizaci je nezbytné mít k dispozici rychlost šíření určité elastické vlny spolu s časovou diferencí příchodu této vlny k dvojici různých snímačů AE. Vzhledem k různým amplitudám zaznamenaných AE událostí lze jen obtížně určit, kterou vlnu, resp. vlnový mód, v tom kterém případě měřicí aparatura zachytila a vyhodnotila jako čas příchodu emisní události. Vzhledem k nezanedbatelnému šumu, který je způsoben chodem zatěžovacího stroje, je pravděpodobné, že aparaturou DAKEL byla nejčastěji zaznamenána S-vlna nebo povrchová vlna, nikoliv rychlá P-vlna, která obvykle zaniká v šumu.

Protože měření rychlosti šíření elastických vln ve vzorku pomocí zkušebních pentestů nedalo jednoznačné výsledky, odhadli jsme rychlost šíření elastické vlny detekované měřicí aparaturou následující úvahou: předpokládejme, že AE události zaznamenané ve druhé polovině prvního dne měření pocházejí ze zdroje vně úsečky snímačů AE01 – AE03. Protože vzdálenost snímačů AE01 a AE02 je 45 mm a zároveň průměrná časová diference Δt_{21} začátků událostí zaznamenaných snímačem AE02 a AE01 během zkoumané fáze zatěžování byla 16,8 μs , bude hledaná rychlost $v_{\text{max}1} = s/\Delta t_{21} = 45/16,8 = 2,68 \text{ mm}/\mu\text{s} = 2680 \text{ m/s}$. Stejně události měli průměrnou časovou diferencí $\Delta t_{31} = 34,8 \mu\text{s}$, což při vzdálenosti snímačů AE03 a AE01 107 mm vede k rychlosti $v_{\text{max}2} = s/\Delta t_{31} = 107/34,8 = 3,07 \text{ mm}/\mu\text{s} = 3070 \text{ m/s}$. Rozdíl v takto vypočtených rychlostech šíření elastických vln může být způsoben nenulovou tloušťkou vzorku, nenulovými rozměry snímačů a tím, že trigger měřicí aparatury spustil u událostí s vyšší amplitudou (bližší) příchod jiného vlnového módu než u událostí nižší amplitudou (vzdálenější). Pokud rychlosti $v_{\text{max}1}$ a $v_{\text{max}2}$ zprůměrujeme, získáme velikost

rychlosti šíření elastické vlny $2,9 \text{ mm}/\mu\text{s}$, což je v dobré shodě s rychlostí šíření S-vlny v oceli.

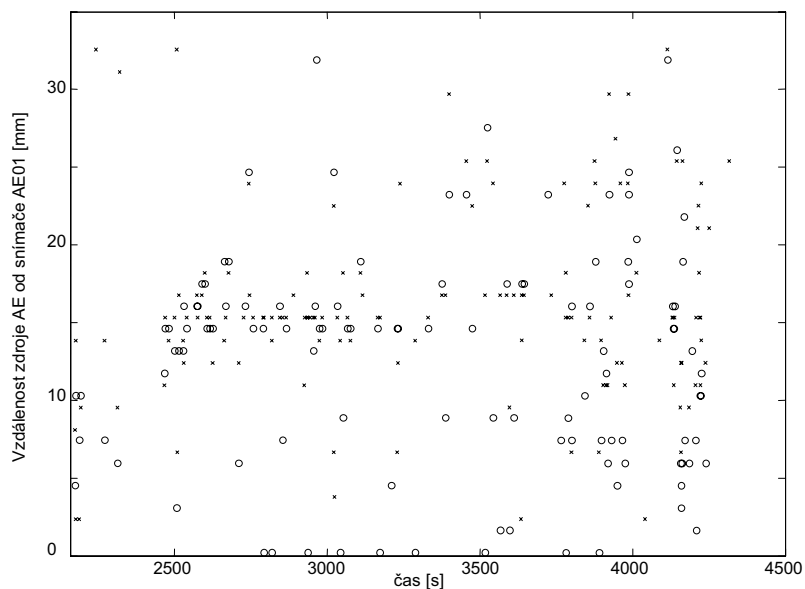
Protože rychlost šíření elastické vlny, která byla vypočtena v předchozím odstavci a která je detekovaná měřicí aparaturou, se blíží rychlosti S-vlny v oceli, je pravděpodobné, že předpoklad, který jsme učinili je pravdivý a že tedy aktivní zdroj periodicky vysílající AE události se nachází vně řady snímačů AE01 – AE03. Konkrétně vpravo od snímače AE01 (viz. obr. 1). Toto tvrzení podporuje i rozdíl v maximálních amplitudách signálů zaznamenaných snímači AE01 a AE03. Již dříve bylo totiž provedeno měření útlumu elastických vln v materiálu z něhož je zhotovena testovaná konzola (podobné měření popsáno v [3]). Bylo zjištěno, že k poklesu amplitudy AE signálu na jednu polovinu dojde na vzdálenosti cca 15 cm (útlum je tedy $20 \text{ dB}/\text{m}$, pokud použijí definici decibelu $\text{dB} = 10 \cdot \log A$). Při měření konzoly č. 3 je poměr maximálních amplitud signálů zaznamenaných kanály 3 a 1 přibližně 0,6. To odpovídá vzdálenosti $\text{vzd} = 10 \cdot \log(1/0,6)/20 = 0,111 \text{ m} = 111 \text{ mm}$. Hodnota 111 mm se velmi dobře shoduje se vzdáleností snímačů AE01 a AE03, která je přibližně 107 mm a tedy AE zdroj musí být vně úsečky AE01 – AE03..

Velmi důležitým faktem je, že řada AE událostí s konstantními časovými diferencemi $\Delta t_{21} = 16\text{-}18 \mu\text{s}$ končí ukončením prvního dne měření. Druhý den se již tyto události v záznamu AE neobjevují.

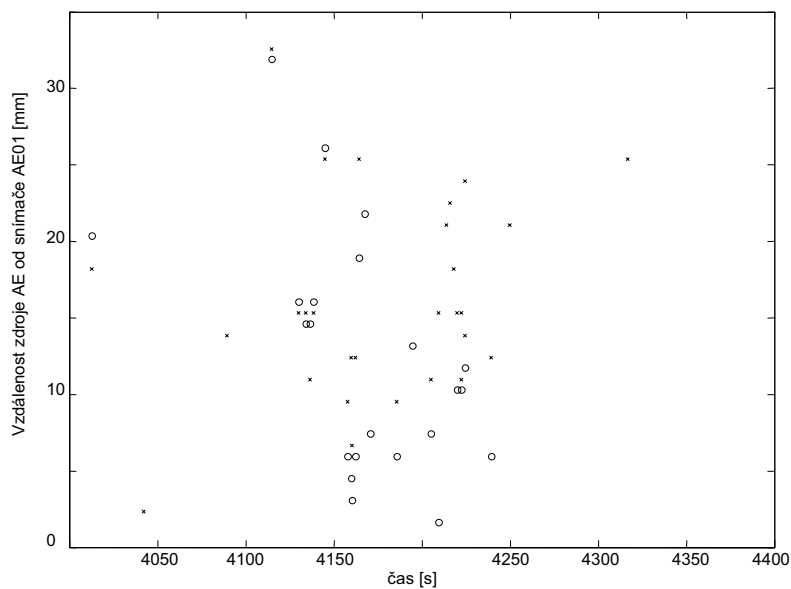
Na základě výše uvedených skutečností se domníváme, že zvýšená emisní aktivita během prvního dne měření není způsobena výskytem vady v testovaném vzorku. Tato emisní aktivita má přísně periodický charakter odpovídající frekvenci cyklování a s největší pravděpodobností pochází z oblasti vně úsečky tvořené snímači AE01 a AE03. Proto se domníváme, že se jedná o akustické rušení způsobené pohybem vzorku v upínacím zařízení.

EMISNÍ AKTIVITA VZORKU VE DRUHÉ POLOVINĚ DRUHÉHO DNE MĚŘENÍ

Do grafů na obr. 8 a 9 (obr. 9 je zvětšený výřez z obr. 8) jsme vynesli lineární lokalizaci událostí AE zaznamenaných druhý den měření v čase 14:36 – 15:15. Na osu x je vynesena čas v sekundách ($0 = 14:00:00 \text{ hod}$), na osu y vzdálenost AE události od snímače AE01 v mm (kladný směr je doleva). Lineární lokalizaci AE událostí jsme provedli jak pomocí dvojice snímačů AE01, AE02 (v grafech vyznačeno křížky), tak pomocí dvojice AE01, AE03 (vyznačeno kolečky). Při lokalizaci jsme v obou případech využili rychlost šíření elastické vlny $v = 2,9 \text{ mm}/\mu\text{s}$, která byla odvozena v minulé kapitole. Pokud hledáme na obr. 8 oblasti konstantní lokalizace AE událostí, které by signalizovaly přítomnost aktivního zdroje AE, je zajímavá oblast časů $t = 2500 - 3800 \text{ s}$ (14:41:40 – 15:03:20). V samotném závěru měření (viz. obr. 9) sice bylo detekováno poměrně dost AE událostí, jejich lokalizace se ale od sebe významně liší. Většina AE událostí zaznamenaných v časovém intervalu t má časovou diferencí $\Delta t_{21} = 5 \mu\text{s}$ a $\Delta t_{31} = 27 \mu\text{s}$. Lineární lokalizace AE událostí s těmito časovými diferencemi vede ke stejnému výsledku - AE zdroj se nachází 15 mm vlevo od snímače AE01 (viz. obr. 1) - ať k lokalizaci použijeme první nebo druhou dvojici snímačů AE. V samotném závěru měření mají časové diference zaznamenaných AE událostí tendenci spíše růst a to na hodnoty $\Delta t_{21} = 7,5 \mu\text{s}$ a $\Delta t_{31} = 32 \mu\text{s}$ (11, resp. 8 mm vlevo od snímače AE01 – viz. obr. 9).



Obr.8: Lineární lokalizace AE zdrojů pomocí snímačů AE01 a AE02 (křížky), resp. AE01 a AE03 (kolečka). Uvedena vzdálenost od snímače AE01, kladný směr je vlevo (obr. 1).



Obr.9: Lineární lokalizace AE zdrojů pomocí snímačů AE01 a AE02 (křížky), resp. AE01 a AE03 (kolečka) – detail předešlého obrázku. Uvedena vzdálenost od snímače AE01, kladný směr je vlevo (obr. 1).

ZÁVĚR

Při měření AE cyklicky zatěžované konzoly č. 3 v červnu 2007 byla zjištěna následující fakta:

- Nízká emisní aktivita vzorku v prvních fázích zatěžování.
- Náhlé zvýšení emisní aktivity první den měření v čase 14:55:30. Tato aktivita měla periodický charakter se střední periodou 2,143 s (odpovídá periodě cyklování). Hodnoty konstantních časových diferencí AE událostí zaznamenaných v této době lokalizují tyto události vně úsečky tvořené snímači AE03 a AE01. Toto tvrzení podporuje rovněž úvaha o útlumu elastických vln uvedená výše.
- Zvýšení emisní aktivity v čase 14:55:30 bylo způsobeno akustickým rušením, které mělo pravděpodobně svůj původ v uchycení vzorku do zatěžovacího zařízení (zdrojem nejpravděpodobněji šroub v otvoru nejbližším snímači AE01).
- Emisní aktivita v první polovině druhého dne měření nevykazuje známky výskytu aktivního AE zdroje (lokalizace jednotlivých AE událostí se od sebe značně liší).
- Druhý den měření v čase 14:42:00 se objevuje řada AE událostí lokalizovatelných do jednoho místa – 15 mm vlevo od snímače AE01. Je značná pravděpodobnost, že v těchto místech vzorku došlo ke strukturálním změnám v materiálu, které mohou být předzvěstí vzniku poškození.
- V závěrečných fázích druhého dne měření dochází k posunu lokalizovatelné emisní aktivity směrem blíže ke snímači AE01.

Z výše uvedených důvodů jsme doporučili pokračovat v cyklickém zatěžování konzoly č. 3 přednostně přitom sledovat kritickou oblast mezi snímači AE01 a AE02 zda nedojde ke vzniku viditelného poškození součásti.

PODĚKOVÁNÍ

Práce byla podporována prostředky z grantu MPO ČR č. FT-TA/026-T9 a grantu GA ČR č.101/07/1518.

LITERATURA

- [1] Blaháček M., Převorovský Z., Chlada M.: Šíření napět'ových vln v leteckých konstrukcích. (Výzkumná zpráva Z-1376/05, ÚT AV ČR, Praha, 2005)
- [2] Blaháček M., Chlada M., Převorovský Z.: Metodika detekce a rozpoznávání zdrojů akustické emise. (Výzkumná zpráva Z-1407/07, ÚT AV ČR, Praha, 2005)
- [3] Blaháček M. a kol.: Elastic wave attenuation in thin wall-structures. (8th European conference on NDT, Barcelona 2002)
- [4] Převorovský Z.: Vliv vlnové disperse a útlumu v ultrazvukové diagnostice tenkostěnných leteckých konstrukcí. (konference Defektoskopie 2005, 267-274, Znojmo 2005)