



DETEKCE ÚNAVOVÉHO POŠKOZOVÁNÍ V KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLECH VYUŽITÍM METODY AKUSTICKÉ EMISE

FATIGUE DAMAGE DETECTION IN CONSTRUCTION MATERIALS USING ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE

František VLAŠIC, Libor NOHÁL, Pavel GEJDOŠ, Pavel MAZAL

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Contact e-mail: yvlasi01@stud.fme.vutbr.cz

Abstrakt

Článek se zabývá monitorováním cyklické degradace konstrukčních materiálů ve vysokocyklové oblasti využitím nedestruktivní metody testování - akustické emise. Naměřené výsledky slouží především ke studijním účelům a tvorbě podkladů pro výuku na Fakultě strojního inženýrství v Brně. Společně se záznamem rezonanční frekvence zatěžovacího zařízení RUMUL Cracktronic lze získat názorné ukázky včasné identifikace vzniku a šíření únavových trhlin ve zkoumaných materiálech.

Klíčová slova: akustická emise, únavové zatěžování, šíření trhliny, rezonanční frekvence

Abstract

The article deals with monitoring of construction materials cyclic degradation in high-cycle area using non-destructive method - acoustic emission. The measured results used primarily for creation of teaching materials and educational purposes at the Faculty of Mechanical Engineering in Brno. The demonstration of early identification of fatigue cracks creation and propagation in the tested materials may be obtained together with the record of resonant frequency of loading equipment RUMUL Cracktronic.

Key words: acoustic emission, fatigue loading, crack propagation, resonant frequency

1. Úvod

V praxi jsou většinou strojní součásti namáhány kmitavým nebo nepravidelně opětovaným zatížením. Tato namáhání navíc nepůsobí samostatně, ale naopak většinou současně jako kombinace dvou i více namáhání (např. tah a ohyb, nebo tah, ohyb a krut). V materiálu pak dochází ke vzniku nevratných procesů, projevujících se jako mikroplastické deformace a po určitém počtu zátěžných cyklů dojde k porušení materiálu při napětím menším než mez kluzu či mez pevnosti. Velké procento poruch kovových součástí ve strojírenské praxi je způsobeno právě tímto jevem, který označujeme jako „únavu materiálu“ [1, 2, 3].

Během cyklického zatěžování dochází v materiálu k řadě strukturálních změn, které můžeme vizuálně v daný moment jen těžko zachytit či zaznamenat a které jsou během zkoušek ovlivňovány množstvím faktorů (např. podmínky zatěžování nebo stav mikrostruktury). Jedna z možností jak hodnotit a monitorovat tyto procesy je

využití metody akustické emise (AE). Jedná se o jednu v poslední době rychle se rozvíjející metodu nedestruktivního testování (NDT), která nachází široké uplatnění nejenom v technických oblastech [4, 5].

Na Fakultě strojíního inženýrství Vysokého učení technického v Brně (FSI VUT v Brně) je aplikaci této defektoskopické metody v oblasti materiálového inženýrství věnována již řadu let velká pozornost, ale ve studijních podkladech kurzů (předmětů), zaměřených na defektoskopii či nedestruktivní testování, je tato problematika prezentována pouze okrajově a na teoretické úrovni. Zejména monitorování statického a cyklického poškozování materiálů během mechanických zkoušek nejenom touto metodou v učebních materiálech pro studenty chybí. Proto vznikl projekt, který má především vysokoškolským studentům, zajímavým se o defektoskopii, přiblížit praktickými ukázkami důležitost a využitelnost těchto nedestruktivních nástrojů v technické praxi, které mnohdy tvoří významnou součást jednotlivých etap výroby a podílí se rozhodujícím způsobem na kvalitě finální produkce. Tento projekt je zaměřen na vytvoření studijních podkladů pro výuku problematiky včasné identifikace vzniku a šíření únavových trhlin v konstrukčních materiálech pomocí metody AE a záznamu průběhu zatěžující (rezonanční) frekvence vzorku na zařízení RUMUL Cracktronic.

2. Metoda AE

V tom nejširším pojetí představuje metoda AE velmi širokou třídu možných aplikací, a to od základních nejjednodušších aplikací, kdy je cílem AE pouze kvalitativně odpovědět na otázku přítomnosti/nepřítomnosti aktivity AE, na otázku počátku či konce aktivity až po aplikace špičkové s využitím techniky digitalizace signálu, jeho pokročilého matematicky náročného vyhodnocení a ještě náročnější interpretaci naměřených dat. Konkrétně se jedná o oblasti provozních kontrol konstrukcí, zařízení, aparátů, strojů, při monitorování technologických procesů a v poslední době v oblasti výzkumu a vývoje, kam spadají také mechanické zkoušky materiálů [6].

Akustickou emisí nazýváme akustické (elastické) vlny, generované dynamickým uvolněním mechanického napětí uvnitř materiálu tělesa. Tyto vlny vznikají v materiálu během interakce jeho strukturních defektů (např. dislokací, mikrotrhlin) s vnějším napětíovým polem (stimulem). Napětíové vlny se šíří tělesem od místa zdroje na volný povrch.

Mezi typické znaky metody AE, které ji vymezují oproti jiným akustickým metodám, především patří:

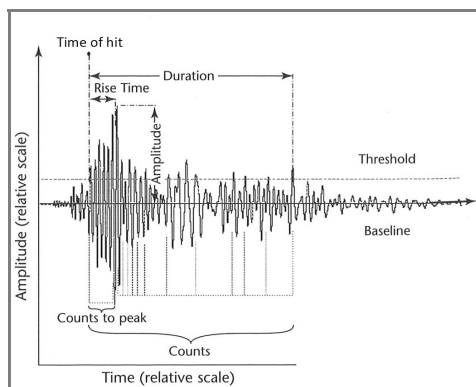
- pasivní monitorování probíhajícího procesu - nevznáší do konstrukce žádné aktivní buzení
- frekvenční pásmo detekovaných vln pohybující se od 30 kHz do 1 MHz (nejčastěji v pásmu cca 100 ÷ 300 kHz)
- detekce frekvenčně širokopásmových procesů (s cílem maximální citlivosti detekce sledovaných procesů) pomocí rezonančních snímačů ve vhodně vybraném frekvenčním okně [6]

V oblasti měření a vyhodnocování signálů AE se používají základní výrazy (pojmy):

- *událost AE* - fyzikální jev, který způsobuje vznik AE (např. posun dislokace, dynamický vznik mikrotrhliny a další)
- *zdroj AE* - fyzikální původ jedné či více událostí AE (proces plastické deformace, mikroposkoky čela trhliny, dvojčatění či posuvy hranice zrna)

- *hit signálu AE* (praskavý, spojitý) – vzniká detekcí rázové vlny jedné události AE

Základními časovými charakteristikami signálu AE obvykle bývá spojitost či praskavost signálu, délka trvání hitu a doba náběhu signálu hitu do maxima. Hity nespojitého (praskavého) signálu ze signálu vybíráme a vyhodnocujeme samostatně. Základní parametry hitu AE jsou znázorněny na obr. 1.



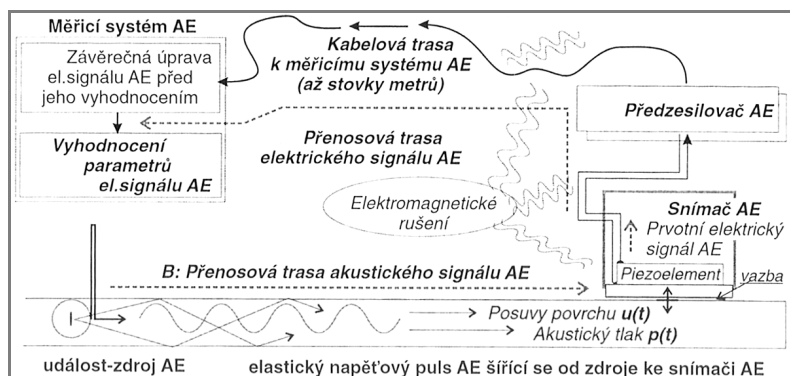
Obr.1 Typické parametry hitu AE [5]

Fig.1 Typical acoustic emission signal [5]

Obecné schéma přenosu signálu od zdroje AE k výslednému signálu je znázorněno na obr. 2. Základní části tvoří:

- *snímač AE* - nejužívanější snímače k detekci AE vln jsou piezoelektrické
- *předzesilovač AE* - zesiluje primární signál ze snímače AE a provádí základní frekvenční filtraci
- *kabelová trasa* - prostředek přenosu zesíleného signálu z předzesilovače k měřicímu systému, který může dosahovat až stovek metrů
- *měřicí systém AE* - závěrečná úprava analogového signálu před vyhodnocením (digitalizace a následné zpracování signálním procesorem)

V oblasti základního výzkumu únavového poškozování materiálů se vědecké práce zaměřují zejména na monitorování jednotlivých stádií únavového procesu. Jedná se především o fáze iniciace, šíření, uzavírání krátkých a dlouhých trhlin nebo práce zaměřené na (vizuální) klasifikaci signálů podle jejich časových a frekvenčních průběhů. Během únavových zkoušek je signál AE způsoben různými mechanismy – pohybem dislokací, cyklickým zpevněním, iniciací či uzavíráním trhlin nebo až samotným lomením vzorku.



Obr. 2 Zjednodušené schéma přenosu signálu AE [6]

Fig. 2 Simplified scheme of the AE signal transfer [6]

3. Metodika měření

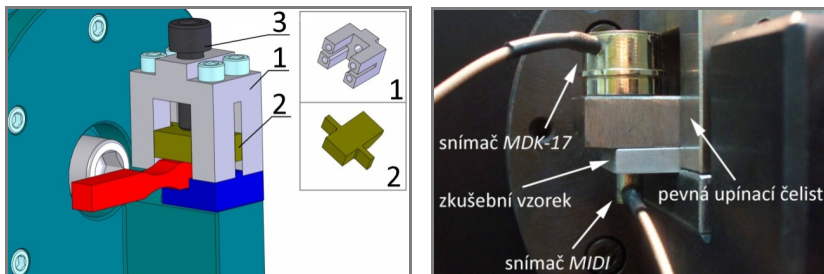
Prezentované ukázky z měření signálu AE během únavových zkoušek byly realizovány na diagnostických systémech firmy ZD Rpety – Dakel. Pro sběr a zpracování dat byly použity dva typy analyzátorů - *Xedo* a *IPL*. První jmenovaný je určen spíše pro záznam signálu v případě dlouhodobějších měření (týdny, měsíce) s poměrně malými nároky na velikost naměřených dat (obr. 3 vlevo). Zařízení *IPL* je využíváno zejména během krátkodobých měření (minuty, hodiny). Tento typ analyzátoru umožňuje 12-bitové synchronní kontinuální vzorkování 4 kanálů frekvencí 2 MHz a nepřetržité ukládání navzorkovaných dat do paměti PC. Data jsou na disk ukládána rychlostí kolem 16 MB/s, což představuje zhruba 56 GB na hodinové měření. Hlavní výhodou oproti systému *Xedo* je možnost po sběru naměřených dat pozměnit jakýkoli parametr AE (práh detekce hitů AE, hodnoty mrtvé doby, atd.) a uskutečnit tak nový výpočet se všemi uloženými daty, jakoby měření probíhalo znovu. Díky této možnosti můžeme offline výpočet opakovat tak dlouho, až budeme s výsledným výstupem (grafem) spokojeni (obr. 3 vpravo).



Obr. 3 Měřicí aparatura *Xedo* (vlevo) a *IPL* (vpravo)

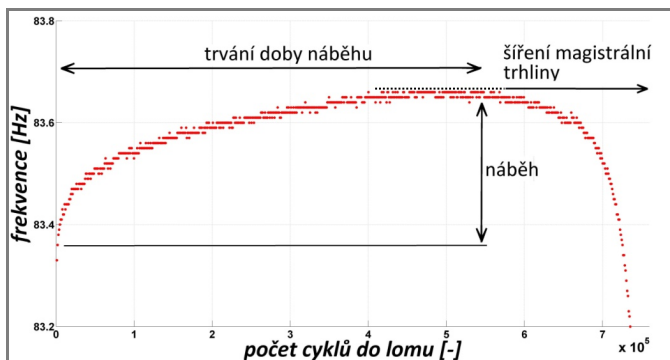
Fig. 3 Measuring system *Xedo* (left) and *IPL* (right)

Únavové zkoušky probíhaly na univerzálním elektrozvukovém pulzátoru RUMUL Cracktronic firmy Russenberger Prüfmaschinen AG. Zařízení umožňuje zatěžovat vzorky v osovém tahu-tlaku, ohybu či krutu a CT tělesa. V tomto příspěvku jsou prezentované výsledky realizovány za podmínek ohybového střídavého symetrického cyklu ($R = -1$) ve vysokocyklové oblasti a teploty okolí (obr. 4).



Obr. 4 Upínací část zařízení RUMUL (vlevo) [7] a detail uchycení snímačů AE (vpravo)
Fig. 4 Clamp part of RUMUL machine (left) [7] and fixing detail of AE sensors (right)

Společně se záznamem rezonanční frekvence zatěžovacího zařízení RUMUL lze získat názorné ukázky včasné identifikace vzniku a šíření únavových trhlin ve zkoumaných materiálech (obr. 5).



Obr. 5 Příklad záznamu rezonanční frekvence ze zařízení RUMUL
Fig. 5 Example of a resonant frequency record from device RUMUL

4. Výsledky

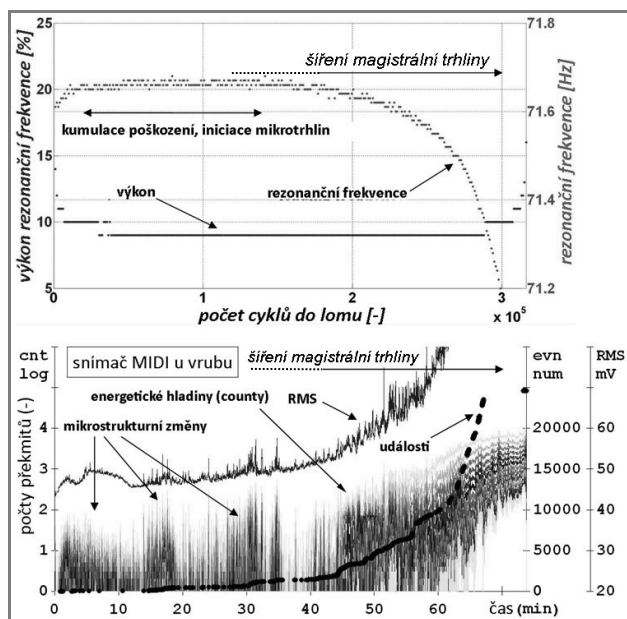
Průběh rezonanční frekvence zkušební vzorku ze zatěžovacího zařízení RUMUL napomáhá zejména s určením počátku šíření magistralní trhliny, který se projevuje evidentním poklesem tuhosti celé soustavy. Z předchozích měření bylo zjištěno, že okamžik počátku klesajícího trendu rezonanční frekvence (např. při $N = 5,5 \times 10^5$ cyklů z obr. 5) neznamenal začátek šíření magistralní trhliny, jak bylo původně uvažováno, ale až období nekystalografického šíření trhliny končící náhlým lomen.

Z toho vyplývá, že vznik a začátek šíření magistralní trhliny probíhá už daleko dříve než v uvažovaném momentu poklesu frekvence.

Během únavových zkoušek se sledují především tyto průběhy a parametry AE:

- záznam rezonanční frekvence zkušebního tělesa ze zatěžovacího zařízení RUMUL
- počet cyklů do lomu
- emisní aktivita (energetické hladiny - county)
- RMS - efektivní hodnota charakterizující energii nebo výkon signálu
- kumulativní četnost hitů a jejich základní parametry (rise time, amplituda, délka)
- vývoj frekvenčních spekter

Na obr. 6 je typická ukázka záznamu signálu AE z analyzátoru Xedo včetně průběhu rezonanční frekvence vzorku. Kolem $1,72 \times 10^5$ cyklů, což odpovídá při průměrné rezonanční frekvenci 71,66 Hz 40. minutě záznamu signálu AE, dochází k viditelnému poklesu tuhosti zkušebního vzorku, který se projevuje rostoucí aktivitou signálu AE až do jeho lomu. Jak již bylo konstatováno výše, v tomto okamžiku už probíhá nekystalografické šíření trhliny.

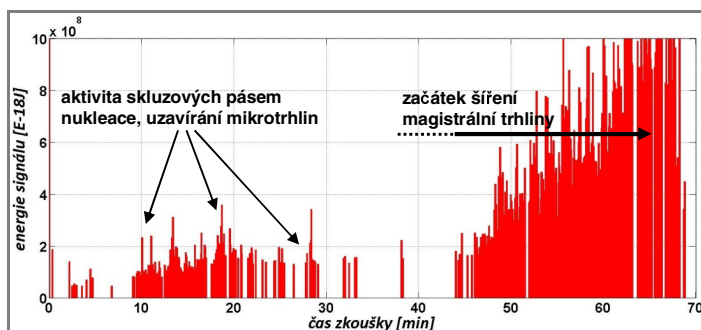


Obr. 6 Záznam rezonanční frekvence zařízení RUMUL (nahore) a typický záznam signálu AE (dole) z vrubu vzorku během únavové zkoušky v ohybu (Al slitina 2017A/T4, $\sigma_a = 210$ MPa, $N_f = 315\,000$ cyklů, symetrický cyklus)

Fig. 6 Record of resonant frequency from device RUMUL (up) and typical record of AE signal (down) during the fatigue bending test (aluminium alloy 2017A/T4, $\sigma_a = 210$ MPa, $N_f = 315,000$ cycles, symmetrical cycle)

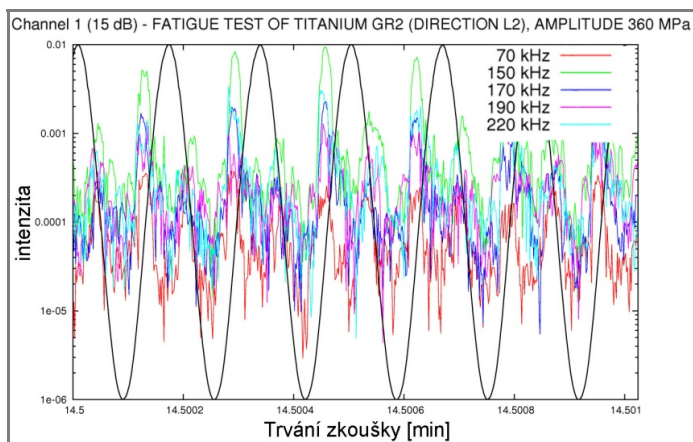
Na záznamu signálu AE můžeme také nalézt místa, která vykazují zvýšenou aktivitu ve stádiu iniciace trhlin (na obr. 6 kolem 16. a 30. minuty), kde můžeme očekávat koncentraci cyklické plastické deformace na povrchu vzorku. Tento proces vede k nukleaci únavových mikrotrhlin, vznikajících většinou v únavových skluzových pásech, na hranicích zrn nebo na rozhraní mezi inkluzemi a matricí. Nicméně identifikovat přesně okamžik vzniku těchto mikrotrhlin na základě signálu AE je zatím velmi obtížné.

Vyhodnocování a zobrazování typických průběhů signálu AE z analyzátoru Xedo se provádí v programu DaeShow, viz. obr. 6. [9] Naměřená data lze také exportovat do textové, příp. binární podoby a zpracovávat je v jiných programech, např. Matlabu. Ukázka této možnosti je na obr. 7, kde je zobrazen průběh energie signálu v čase.



Obr. 7 Průběh energie signálu AE během únavové zkoušky v ohybu (titan Gr2, $\sigma_a = 360$ MPa, $N_f = 424$ 100 cyklů, symetrický cyklus)

Fig. 7 Course of changes energy of AE signal during the fatigue bending test of titanium Gr2 (symmetrical cycle, $\sigma_a = 360$ MPa, $N_f = 424$, 100 cycles)



Obr. 8 Ukázka vývoje intenzity frekvenčních spekter během únavové zkoušky

Fig. 8 Example of trend intensity of frequency spectrum during the fatigue test

Ukázka záznamu signálu AE z analyzátoru IPL, umožňující kontinuální vzorkování a ukládání dat do PC, je na obr. 8. Jedná se o krátký úsek únavové zkoušky titanu Grad 2, kde je zobrazen vývoj intenzity frekvenčních spekter na vybraných frekvencích v čase společně s průběhem amplitudy ohybového napětí 408 MPa.

5. Závěr

Uvedené příklady ukazují na rozsáhlé možnosti využití metody AE v oblasti mechanických (únavových) zkoušek materiálů. Rozšířený soubor naměřených dat včetně videoukázek z měření bude sloužit pro tvorbu studijních podkladů na FSI VUT v Brně. Studenti tak mohou získat na konkrétních experimentech nejnovější poznatky z oblasti únavového poškození materiálů a uvědomit si tak významný přínos NDT v technické praxi.

Ze získaných poznatků lze usoudit, že obor nedestruktivního testování materiálů může zásadním způsobem promluvit do procesu únavového poškození a obohatit dosavadní vědomosti o další přístupy a výsledky.

Poděkování: Příspěvek vznikl za podpory projektu FRVŠ "3070/2011/G1" - Detekce počátku šíření únavových trhlin pomocí metody akustické emise a změny frekvence zatěžování.

Literatura

- [1] MICHNA, Š. et al. *Aluminium Materials and Technologies from A to Z*: Alcan Děčín Extrusions, s r. o., 2007. p. 613. ISBN 978-80-89244-18-8.
- [2] KLESNIL, M., LUKAS, P. *Fatigue of metallic materials*. Amsterdam: 2. rev. vyd.: Elsevier, 1992. p. 270. ISBN 0-444-98723-1.
- [3] FIALA, J., MENTL, V., ŠUTTA, P. *Struktura a vlastnosti materiálů*. Praha: Academia, nakladatelství Akademie věd ČR, 2003. str. 561. ISBN 80-200-1223-0.
- [4] KREIDL, M., ŠMÍD, R. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. str. 406. ISBN 80-730-0158-6.
- [5] MILLER, R. K., HILL, Eric v. K and MOORE, P. O. *Acoustic emission testing*. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2005. p. 446. Vol. 3rd. ISBN 15-711-7106-1.
- [6] KOPEC, B. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. str. 571. ISBN 978-807-2045-914.
- [7] BERAN, P. *Modifikace upínací části zkušebního zařízení RUMUL Cracktronic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. str. 57. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [8] VLAŠIC, F.: Hodnocení cyklického poškození slitin na bázi hliníku a hořčíku s využitím metody akustické emise. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. str. 170. Disertační práce, školitel Pavel Mazal.
- [9] Mazal P.; Dvoracek J.; Pazdera L.: *Application of acoustic emission method in contact damage identification*, International Journal of Materials & Product Technology, Vol. 41, Iss. 1-4, p. 140-152, 2011, ISSN 0268-1900

**PAPERS AFTER DEADLINE,
ABSTRACTS AND
PAPERS OUT OF INSTRUCTIONS
FOR AUTHORS**

