

MOŽNOSTI ANALÝZY STUPNĚ POŠKOZENÍ CYKLICKY NAMÁHANÝCH KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ TECHNIKOU AKUSTICKÉ EMISE

POSSIBILITY OF DAMAGE DEGREE ANALYSIS OF CYCLIC LOADED CERAMICS WITH ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE USING

Jiří Horský, Pavel Mazal¹, Michal Kotoul², Vladimír Kotek³

Abstract

A preliminary study of acoustic emission as a way of sensing damage in cemented carbides WC-Co and alumina/zirconia ceramics in low cycle compression-compression conditions was performed. Significant differences in acoustic emission data gathered on cemented carbides samples and alumina/zirconia ceramics samples were observed. The goal of further research is proposed.

Klíčová slova: akustická emise, cyklické zatěžování, keramický materiál

Úvod

Velká skupina relativně levných částicových kompozit tvořených křehkou maticí a disperzí tvárných částic pro zvýšení houževnatosti má výrazně odlišné mechanické vlastnosti v tahové a tlakové oblasti zatěžování. Slinuté karbidy a technické keramiky vykazují některé výrazně lepší mechanické vlastnosti ve srovnání s vysocepevnými ocelmi (tuhost, otěruvzdornost, vysoká pevnost v tlaku apod.). Tyto materiály často nachází uplatnění v technických zařízeních, kde rozhodující zatěžování je tlakové kvazistatické, příp. míjívé cyklické. V současné literatuře je již dostupná řada informací o poškozování křehkých materiálů pod účinkem kvazistatického tlakového zatížení, avšak velmi málo je známo o mikromechanice poškozování při působení cyklického tlakového namáhání. Jednou z příčin tohoto stavu je velmi obtížná experimentální identifikace rozvoje poškozování takto zatěžovaných materiálů.

Jednou z nadějných možností sledování průběhu poškozování materiálů vystavených mechanickému namáhání je využití techniky AE. Tato metoda NDT vychází z poznatku, že každá aktivní porucha v materiálu je zdrojem vlnění, které se šíří materiálem konstrukce všemi směry. V signálu snímaném na povrchu zatěžovaného vzorku je možno identifikovat průběh řady dějů, které vznikají v materiálu konstrukce. Metoda se velmi úspěšně využívá pro testování stavu nejrozličnějších technologických zařízení, reaktorů, tlakových nádob, produktovodů apod. S rozvojem sofistikovaného zpracování signálu si AE postupně nachází

¹ Ing. Jiří Horský, Ing. Pavel Mazal, CSc. Ústav konstruování, FSI, VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, horsky@iris.fme.vutbr.cz, mazal@uk.fme.vutbr.cz

² Doc.RNDr. Michal Kotoul, CSc., Ústav mechaniky těles, FSI, VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, kotoul@umtn.fme.vutbr.cz

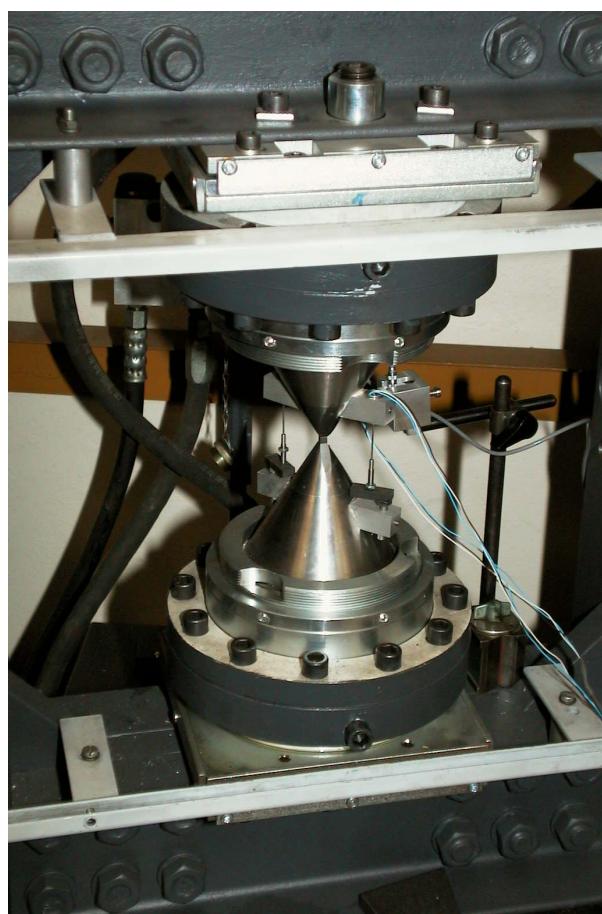
³ Ing. Vladimír Kotek, Sdružené pracoviště ÚT A~V ČR Praha a Ústavu mechaniky těles FSI VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, kotek@umtn.fme.vutbr.cz

cestu i do laboratoří, které se zabývají podrobným studiem materiálových parametrů. V tomto příspěvku se budeme konkrétně zabývat prvními zkušenostmi s využitím techniky akustické emise při sledování rozvoje poškození keramických materiálů při cyklickém tlakovém zatěžování.

Experimentální materiál a zkušební zařízení

Experimentálními tělesy byly vzorky ve tvaru kostky s rozměry 5x5x5 mm vyrobené ze dvou skupin materiálů. První experimenty byly realizovány na materiálu tvořeném matricí WC s Co pojivem (cca 10%). Druhou skupinu tvořil keramický materiál DISAL 520 (38% ZnO_2 ; 2% Y_2O_3 ; 60% Al_2O_3).

Vzorky byly tlakově zatěžovány na speciálním zatěžovacím zařízení v ÚMT FSI VUT v Brně. Toto zařízení lze konstrukčně rozdělit na část ovládací a část zatěžovací. Ovládací část se skládá z hydraulického tlakového okruhu a elektronické řídicí části. Tlakový okruh je



Obr.1: Mechanická část zatěžovacího zařízení

tvořen základní olejovou nádrží, která je vybavena elektrickým topným tělesem řízeným termostatem. Dále pak elektromotorem, který tvoří s dvojitým zubovým hydrogenerátorem vertikálně situovaný celek a generátory jsou tak ponořeny do oleje. Pohon tvoří dva nezávislé obvody se stejnou funkcí (pro jednotlivé osy zatěžování). Tlakový olej je přiváděn z hydrogenerátoru přes jednosměrný elektromagnetický ventil na pojistovací ventil, tlakoměr s odpojovačem, na rozváděcí kostku zatěžovacího zařízení a pod membrány s kužely. Do každého okruhu je zapojen absolutní snímač tlaku s rozsahem do 200 bar. Elektronická část je postavena na využití miniaturního řídicího automatu SESTEP 190, který pracuje jako programovatelný sekvencer. Základní procesorová jednotka kombinuje vstupy s kladnou či zápornou polaritou a reléové výstupy.

Zatěžovací mechanická část zařízení je tvořena samonosným rámem, v němž jsou upevněny zatěžovací kužely (obr.1). Každý z kuželů je polohovatelný v horizontální rovině prostřednictvím unášecích desek. Horní kužel je dále polohovatelný i ve svislém směru. Vlastní zatěžování kuželů je realizováno přes membrány, na kterých jsou kužele

uchyceny v nosné objímce. Do prostoru pod membránou je přiváděn tlakový olej. Nad nosnou objímkou každého kužele je upevněna ochranná objímka, jejíž funkce spočívá v zabránění volného posuvu membrán s kužely proti sobě v případě destrukce vzorku. Na kuželech jsou upevněny držáky indukčních snímačů dráhy s rozsahem do 1 mm. Snímače jsou umístěny proti sobě a jsou určeny ke sledování průběhu deformací vzorku při zatěžování.

Pro měření akustické emise byly zatím použity dva typy analyzátorů. Nejdříve byl nasazen čtyřkanálový analyzátor AED FTA 4, který umožňuje snímat signál AE až ze čtyř

míst. Vhodným se jeví umístění snímače AE s vlnovodem přímo na zatěžovaný vzorek, druhý snímač je umístěn na povrchu jednoho ze zatěžovacích kuželů a třetí snímač je použit jako etalon, který je schopen detekovat případné rušivé vlivy okolí. Při tomto uspořádání je možno poměrně spolehlivě identifikovat děje probíhající přímo v oblasti zatěžovaného vzorku a odlišit je od vlivu zatěžovacího zařízení, případně jiného vnějšího rušení. Tento přístroj je schopen provést hladinovou analýzu signálu s jeho rozčleněním až do 255 hladin. Nevýhodou analyzátoru AED FTA4 je však dosud neukončený vývoj řídicího software, který dovoluje zpracovat pouze část informací obsažených ve snímaném signálu a velmi omezené zobrazení tvaru AE událostí.

V závěru roku 1999 byl použit zcela nový čtyřkanálový analyzátor Dakel Xedo. Zařízení obsahuje měřicí kanálové jednotky pro měření parametrů akustické emise (AE) při připojení pasivních piezokeramických snímačů bez předzesilovače nebo aktivních snímačů s integrovaným předzesilovačem. Analogový signál ze snímače je dále po filtraci zesílen zesilovačem s nastavitelným ziskem a je přiveden na vstup 10-ti bitového A/D převodníku se vstupním rozsahem ± 0.5 V. Další zpracování signálu již probíhá plně digitálně v číslicovém zařízení realizovaném s programovým hradlovým polem Xilinx XC4003E, kde jsou testovány překročení prahů, detekce emisních událostí apod. Výstup A/D převodníku je zároveň přiveden přímo na DMA vstup signálového procesoru kde je emisní signál vzorkován s opakovací frekvencí 1, 2, 4 nebo 8 MHz. Měření parametrů AE není na vzorkování nijak závislé, dojde-li k zastavení vzorkování a přenosu snímaného signálu do PC, neovlivní to žádným způsobem ostatní měření. Pro připojení systému k řídicímu počítači je použito standardní rozhraní Ethernet. Další zpracování signálu je již plně v režii PC, na kterém je nainstalovaný příslušný software. Určitým omezením tohoto analyzátoru je však pouze dvou-hladinová analýza AE signálu.

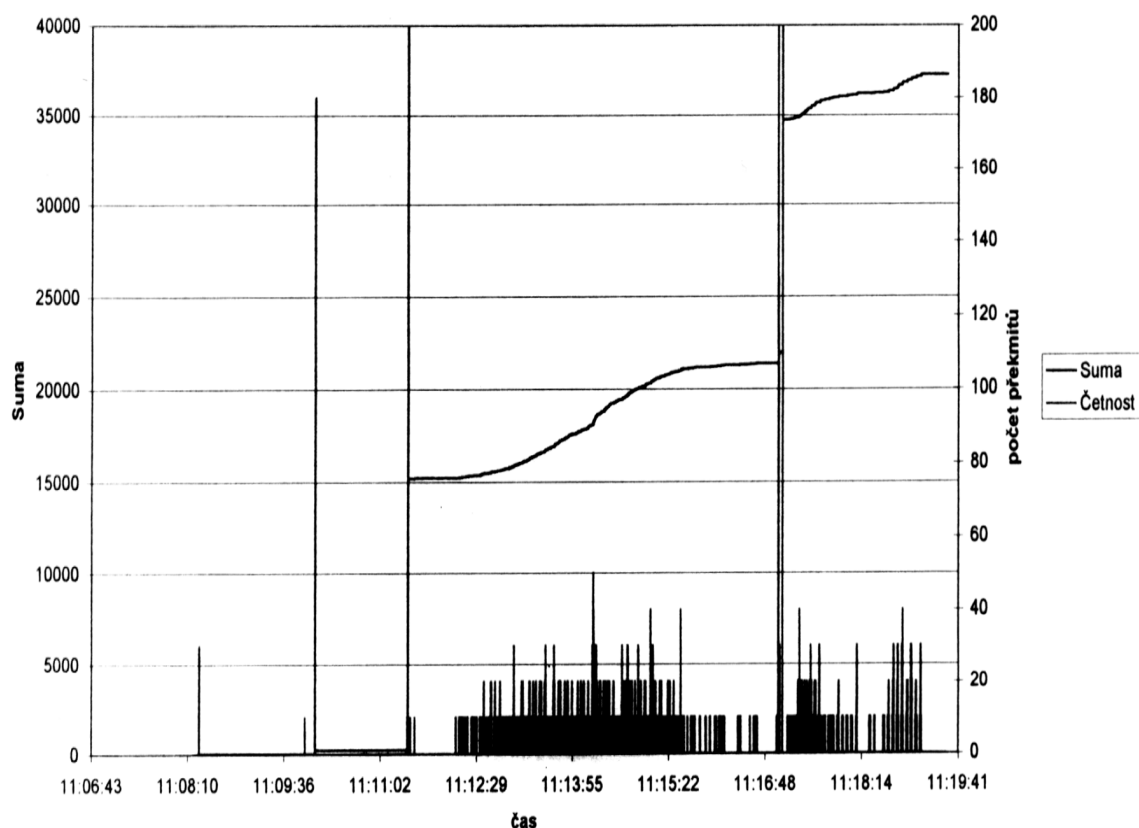
Experimentální výsledky

Vzhledem k tomu, že uvedené experimenty v současné době stále probíhají, je nutno tuto kapitulu chápat jako informaci o probíhajícím měření, výsledky zde uvedené jsou pouze předběžné a budou dále zpřesňovány.

Výsledky naměřené na několika vzorcích byly zatím zpracovány do podoby časových závislostí součtů všech sejmutých překmitů a dále četností překmitů v průběhu zatěžování. Pokročilejším způsobem zpracování je snímání tvarů vybraných událostí a jejich zpracování pomocí různých matematických operací. Typické projevy poškozování materiálu v záznamu signálu AE jsou zobrazeny na následujících obrázcích.

Na *obr. 2* jsou uvedeny četnosti AE překmitů a jejich sumace od počátku zatěžování na materiálu WC s Co pojivem. Tímto poměrně jednoduchým a přehledným způsobem je možno sledovat základní trendy porušování a identifikovat jejich časový průběh. Údaje o četnosti překmitů přes dvě prahové úrovně Count1 a Count2 a střední kvadratická úroveň detekovaného signálu (RMS - root mean square) v závislosti na čase jsou zachyceny na *obr. 3*. Hodnoty Count1 a Count2 jsou zobrazovány v měřítku levé logaritmické osy $0-10^6$, hodnota RMS v měřítku pravé lineární osy $0-1000$ mV (keramický materiál).

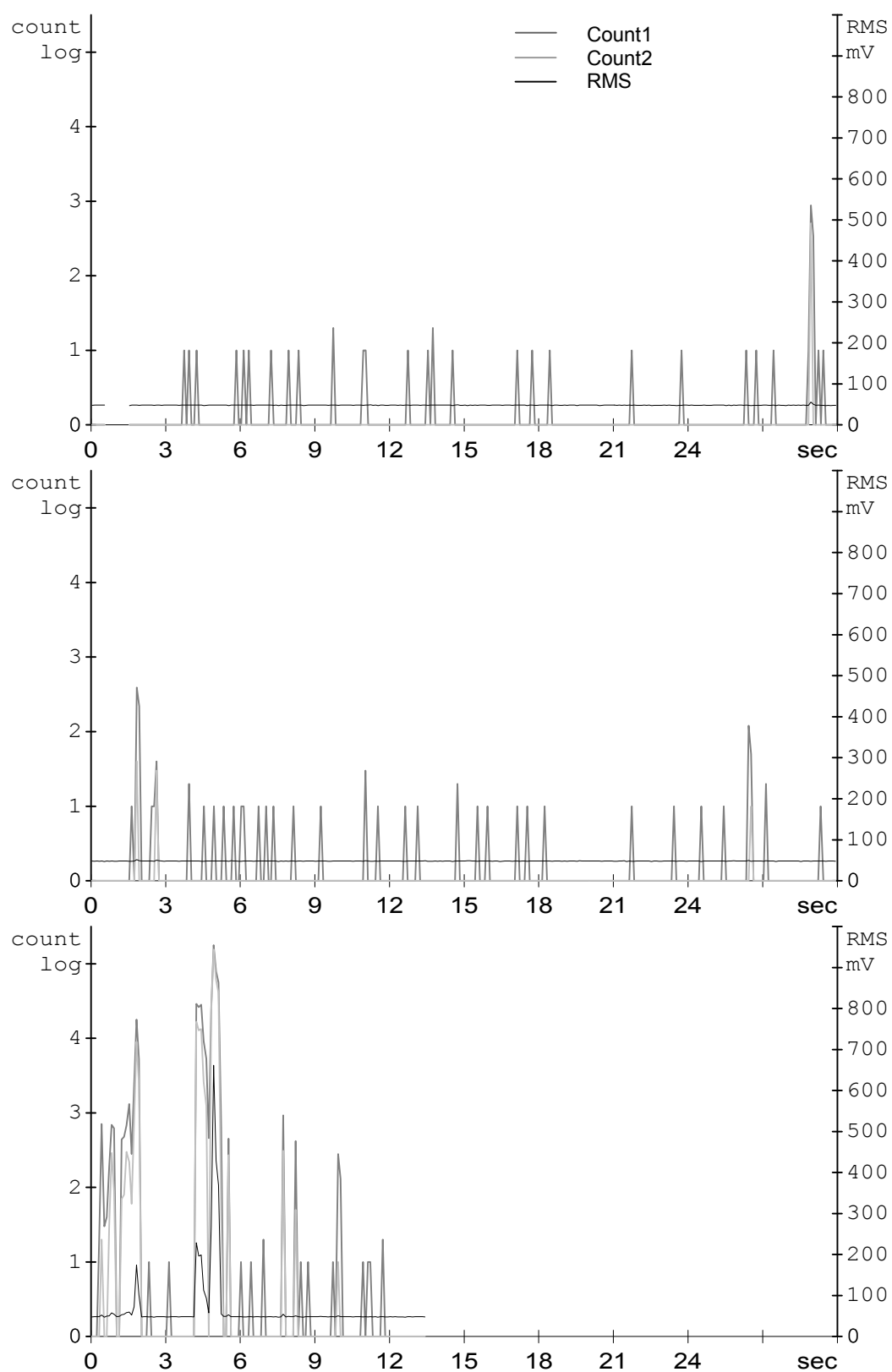
Sumace překmitů a hodnoty RMS v závislosti na čase nám dávají informace především o rychlosti vzniku porušení. Velmi obtížně je však možno hodnotit konkrétní příčinu emisní události.



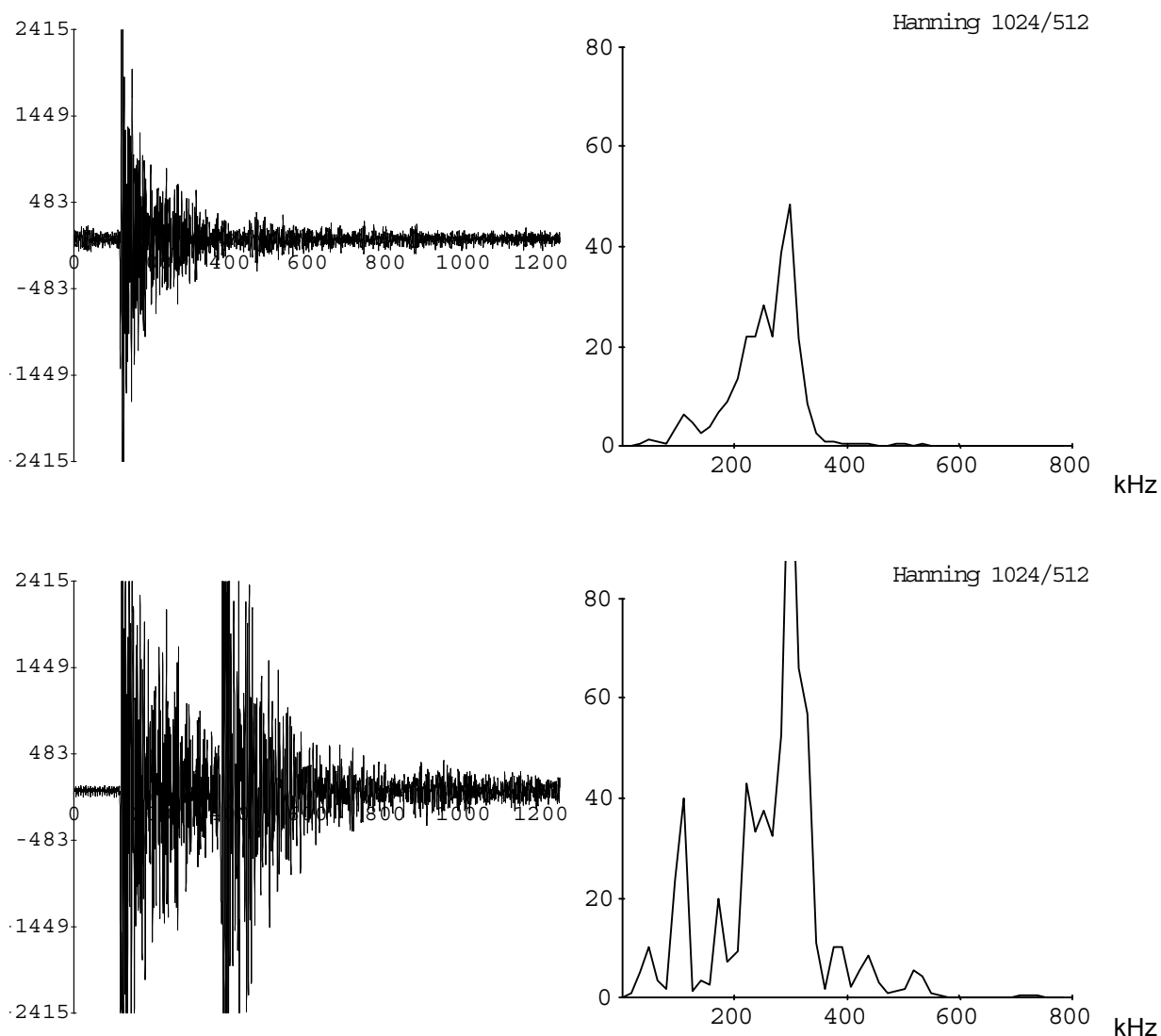
Obr.2 Záznam počtu četností AE překmitů a součtová křivka (analýzátor AED FTA 4), materiál WC s Co.

Pro možnost detailnějšího popisu průběhu poškození a zejména pro kvalifikovaný odhad zdroje signálu AE je nutno využít možnosti záznamu a následného rozboru tvaru signálu snímaného v průběhu jednotlivých etap zatěžování.

V našem případě jsme pro zjištění podstaty zdroje AE použili Fourierovu transformaci pro vybrané typické události AE. Zde vycházíme z fyzikální podstaty jevu akustické emise, kdy dochází v určitých místech materiálu v důsledku dynamických procesů stimulovaných vnějšími nebo vnitřními silami k uvolňování materiálem akumulované energie ve formě tranzitních napětových vln. Tyto vlny vznikají v materiálu během interakce jeho strukturních defektů (dislokací, mikrotrhlin,...) s vnějším napětovým polem. Napětové vlny se šíří tělesem od místa zdroje na volný povrch. Průchodem napětové vlny se část uvolněné energie mění v teplo, část vyvolává na povrchu tzv. Rayleighovu vlnu a zbytek energie se vrací zpět do materiálu prostřednictvím odražené vlny. Povrchová energie je pak vhodným snímačem AE zachycena a podle frekvenčního spektra této vlny je následně možné přibližně určit k jakým změnám uvnitř materiálu dochází. Jestli se jedná o fázové přeměny, aktivní mřížkové poruchy, případně o šíření lomu a pod.



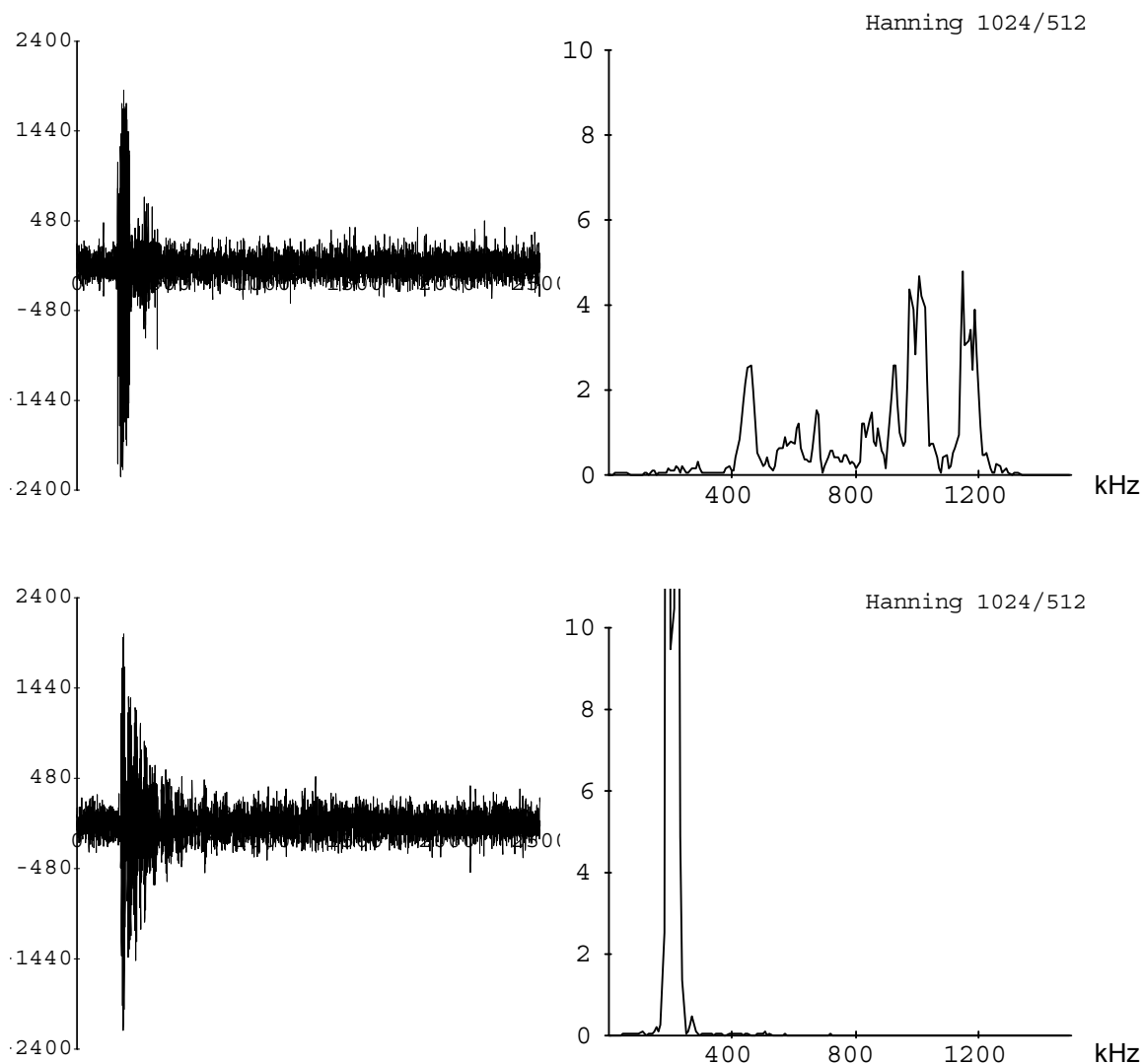
Obr.3: Příklad snímaných četností AE překmitů a hodnoty RMS v závislosti na čase – keramický materiál DISAL 520, analyzátor Dakel Xedo (časové osy na sebe bezprostředně navazují)



Obr.4 Tvar signálu vybraných událostí v různých etapách poškození a jejich zpracování pomocí Fourierovy transformace (max. signálu v oblasti cca 300 kHz) - Dakel – materiál WC s Co pojivem.

Obr. 4 a 5 ukazují tvar vybraných událostí AE a jejich frekvenční spektrum při cyklickém namáhání obou sledovaných materiálů. Vzhledem k tomu, že signál není stacionární je použita při zpracování okénková Fourierova transformace (STFT – Short Time Fourier Transform) s okénkem Hanning.

Již první porovnání ukazuje zásadní rozdíly ve tvaru signálu i jeho frekvenčním rozboru – zejména v případě keramického materiálu (*obr.5*) se daří odlišit zcela rozdílné záznamy, které pochází od různých dějů v zatěžovaném materiálu. Zřejmý i je frekvenční posuv jednotlivých událostí i rozdíly mezi materiálem keramickým a materiálem WC s Co.



Obr.5: Tvar signálu vybraných událostí AE s následující Fourierovou transformací, materiál DISAL 520, analyzátor Dakel – max. v oblasti cca 200 kHz.

Závěr

Experimentální výsledky představené v příspěvku naznačují možnosti, které je možno od využití techniky AE očekávat v oblasti detekce průběhu poškození cyklicky zatěžovaných materiálů. Při využití základního způsobu zpracování AE signálu je možno z četností AE překmitů a z jejich sumace určovat okamžiky výraznějších změn, k nimž dochází v zatěžovaném materiálu. Určitým prohloubením poznatků může být i vyhodnocování tzv. histogramů, které vyjadřují „hladinovou analýzu“ signálu. Tyto histogramy se v průběhu rozvoje poškození mění – roste počet překmitů ve vyšších hladinách. Tyto rozborů je však možno provádět pouze na analyzátoch akustické emise, které jsou schopny rozlišit ve snímaném signálu nejméně 8 hladin.

Pro kvalifikovaný odhad skutečných zdrojů akustické emise v materiálu je však nutno využít mnohem náročnější zpracování signálu s využitím vhodných matematických postupů. Na větším množství vzorků je nutno sejmut charakteristické tvary událostí v jednotlivých

etapách poškozování a provést důkladnou frekvenční analýzu. Předpokládáme, že podrobný rozbor signálu AE umožní u keramických materiálů odlišit zdroje AE související s mikrolomovým porušením a napětově indukovanou martensitickou transformací částic ZrO_2 . Ve spojení s metalografickými a fraktografickými rozbory pak bude možno vytvořit základní model porušování materiálu a jeho odraz v signálu AE. Dalšími experimenty ve spojení s teoretickými modely pak bude možno tento základní model postupně zpřesňovat a přibližovat skutečnému stavu.

Práce představené v tomto příspěvku probíhají za podpory projektů GA ČR č. 101/99/0829 a 101/96/K264.

Literatura k tématu příspěvku:

- 1) NÜFFER, J. et al.: Acoustic emission and state of fatigue of ferroelectric $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$. In: Int. conf. AE'99, Brno University of Technology, Brno, 1999, p.175.
- 2) CHMELÍK, F.- LUKÁČ, P.: Application of acoustic emission in metal physics and materials science. In: Int. conf. AE'99, Brno University of Technology, Brno, 1999, p.57.
- 3) SCOTT, I.G.: Basic Acoustic Emission. NDT Monographs and Tracts - Vol.6. Gordon and Breach Science Publishers, Montreux, Switzerland, 1991.
- 4) TIWARI, A. et al.: Modeling of stress-strain response of unidirectional and cross-ply SiC/CAS-II ceramic composites by acousto-ultrasonic parameters. Journal of Acoustic Emission, Vol.14, No.2, p.53, 1996.
- 5) BIDLINGMAIER, T. et al.: Acoustic emission Monitoring during Compressive Deformation of γ -TiAl-Base Alloys. In: 23rd European Conference on Acoustic Emission Testing, p.93, TUV Austria, Wien, 1998.
- 6) TIWARI, A. et al.: Modeling of stress-strain response of unidirectional and cross-ply SiC/CAS-II ceramic composites by acousto-ultrasonic parameters. Journal of Acoustic Emission, Vol.14, No.2, p.53, 1996.
- 7) THANOOJA, S. et al.: The use of modal parameters in non-destructive evaluation of damage in composite structures. In. 14th World conference on NDT, New Delhi, p. 1141, 1996.
- 8) RAY, A.K et al.: Acoustic emission studies during indentation on ceramic and ceramic composite. In. 14th World conference on NDT, New Delhi, p. 2455, 1996.