

MONITOROVÁNÍ PLASTICKÉ DEFORMACE V RANÝCH STÁDIÍCH ÚNAVOVÉHO PROCESU UŽITÍM METODY AKUSTICKÉ EMISE ACOUSTIC EMISSION MONITORING OF PLASTIC DEFORMATION IN INITIAL STAGES OF FATIGUE PROCESS

František VLAŠIC *, Václav KOULA **, Pavel MAZAL *, Pavel GEJDOŠ *
* Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
** Zemědělské družstvo Rpety, středisko DAKEL
Contact e-mail: vlasic@fme.vutbr.cz

Abstrakt

Článek se zabývá výzkumem cyklického poškozování zkušebního materiálu v počátečních stádlích únavového procesu za použití metody akustické emise. Cílem práce bylo zrealizovat několik únavových zkoušek do vzniku trhliny a provést podrobnou analýzu signálu akustické emise. Ta byla založena zejména na separaci hitů dle jejich podobnosti a rozdělení do jednotlivých tříd. Během únavových zkoušek také byla na elektrorezonančním pulzátoru RUMUL Cracktronic zaznamenávána rezonanční frekvence, která je funkcí tuhosti zkušebního tělesa. Výsledky ukázaly velkou citlivost signálu akustické emise při přechodu ze stádia tvorby a vývoje povrchového reliéfu do fáze nukleace a šíření trhliny.

Klíčová slova: akustická emise, vysokocyklová únava, trhlina, titanová slitina

Abstract

The paper deals with research of cyclic damage of tested samples in initial stages of fatigue process using acoustic emission method. The goal of the work was to perform fatigue tests to crack initiation and make detailed analysis of acoustic emission signal. This analysis was primarily based on the waveform similarity and division into classes. All measurements have been completed with registrations of resonance frequency changes for the tested sample taken with the fatigue equipment RUMUL Cracktronic. The results showed the high sensitivity of acoustic emission technology in the transition from the stage of surface relief evolution to the stage of crack nucleation and propagation.

Key words: acoustic emission method, high-cycle fatigue, crack, titanium alloy

Úvod

Potřeba nových materiálů zejména v leteckém průmyslu, spojená s požadavky na zvyšování odolnosti proti cyklickému porušování za normálních i zvýšených teplot, vede vědecké pracovníky k dalšímu prohlubování poznatků o jejich mechanických vlastnostech a procesech porušování. Při postupném zvyšování požadavků se po slitinách železa, hliníku nebo hořčíku nejvíce prosazují titanové slitiny, které se

vyznačují především příznivým poměrem meze pevnosti k měrné váze (i při vyšších teplotách), dobrou svařitelností, odolností proti korozi a vyhovují přísným požadavkům na rovnost plechů malé tloušťky [1, 2]. Nejčastěji používanými titanovými materiály v leteckém průmyslu jsou dvoufázové slitiny titanu Ti6Al4V a Ti5Al2,5Sn.

Typickými znaky, které rozhodují o odolnosti titanových slitin proti cyklickému namáhání, jsou citlivost na charakter mikrostruktury a fázové složení, přítomnost nečistot (vodík, kyslík), citlivost na rychlost deformace a povrchové úpravy a změny vlastností s teplotou. Již po poměrně malém počtu cyklů mohou vznikat zřetelné skluzové pásy a únavové mikrotrhliny. Cyklické zatěžování je vždy spojeno s poměrně malou plastickou deformací a hlavním mechanismem vzniku a šíření trhliny je skluz a mezifázové porušení [3, 4].

Největší počet prací byl věnován stádiu šíření únavových trhlin, kdežto vznikem prvních mikrotrhlin u zkušebních těles ze slitiny Ti6Al4V se zabývalo poměrně málo autorů. Proto je tato práce zaměřena na počáteční stádia únavového procesu. Zvláštností titanových slitin je možnost vzniku prvních únavových mikrotrhlin pod povrchovou vrstvou, které se často vyskytují při střídavém ohybu a při tahovém napětí v oblasti vysokocyklové únavy [5, 6].

Jedna z možností, jak monitorovat procesy probíhající v materiálu během únavového zatěžování, je využití nedestruktivních metod. Vzhledem k tomu, že jsou při pozorování podstatné pouze aktivní děje (pohyb dislokací, tvorba skluzových pásem či trhlin a další), nejvhodnější variantou se stává moderní metoda akustická emise (AE). Přestože se tato metoda nejčastěji využívá při tlakových zkouškách a při hodnocení technického stavu objektů, významnou roli hraje také v oblasti základního výzkumu hodnocení fyzikálních procesů v materiálu při statických a únavových zkouškách. Jedná se o objemovou metodu, tzn., že se při měření detekují pouze aktivní defekty (diskontinuity) a to v celém objemu, nikoli na konkrétním místě. Proto se stává silným nástrojem pro včasné varování před nečekaným selháním konstrukce či jiných provozních zařízení. Největší přínos této progresivní metody však spočívá v lokalizaci aktivních (nebezpečných) zdrojů, po které většinou následují ultrazvuková měření míst s nejvyšší četností emisních událostí.

K popisu daného stupně poškození materiálu se při únavových zkouškách nejčastěji využívá kumulativní četnost příchozích signálů (hitů AE). Samozřejmě se využívají i další aspekty hodnocení, které jsou založeny na kvalitativních parametrech detekovaného signálu. Standardně se rozlišují tři stádia únavového procesu, během nichž může být generován signál AE. Jedná se o iniciaci trhlin a pomalé a rychlé šíření trhlin [7]. Přesnou hranici mezi těmito stádii nelze jednoznačně určit, ale většinou se přechodové jevy projevují zvýšeným růstem emisních událostí. Optická měření např. ukazují, že kumulativní četnost událostí přibližně odpovídá rychlosti růstu (již objevené) trhliny. Tyto poznatky pak mohou být využity při predikci konečného selhání měřeného objektu.

Na Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství v Brně je činnost výzkumné skupiny "Únavové vlastnosti" zaměřena zejména na aplikaci metody AE v oblasti základního výzkumu hodnocení fyzikálních procesů probíhajících v materiálech při cyklickém zatěžování. V této práci je AE využita ke studiu cyklického chování titanové slitiny Ti6Al4V v počátečních fázích únavového procesu.

1. Zkušební materiál a zařízení

Pro následující experimenty byla použita nejrozšířenější titanová slitina Ti6Al4V (Grade 5) dodaná v žíhaném stavu. Chemické složení je v tab. 1. Z profilu o rozměrech 17 x 80 mm byla vyrobena zkušební plochá tělesa s mělkým vrubem uprostřed pro iniciaci trhliny. Mikrostruktura a geometrie tělesa je na obr. 1 a 2. Únavové zkoušky byly realizovány při pokojové teplotě na univerzálním elektrorezonančním pulzátoru RUMUL Cracktronic 8204/160.

Tab. 1 Chemické složení slitiny Ti6Al4V (hm. %) Table 1 Chemical composition of Ti6Al4V alloy (wt. %)

| Ν | С | Н | Fe | 0 | Al | V | Ti |
|-------|------|-------|------|------|-----|-----|------|
| 0,008 | 0,01 | 0,003 | 0,04 | 0,06 | 6,3 | 4,3 | Bal. |



Obr. 1 Značení zkušebních těles (a), mikrostruktura slitiny Ti6Al4V (b) Fig. 1 Marking of specimens (a), microstructure of Ti6Al4V alloy (b)



Obr. 2 Tvar a rozměry zkušebního tělesa Fig. 2 Specimen's geometry

Měření signálu AE bylo provedeno na systémech XEDO od firmy ZD Rpety středisko DAKEL. Pro detekci napěťových vln na povrchu materiálu byly použity tři pasivní piezokeramické snímače typu MIDI (průměr 6 mm). Jeden byl upevněn přímo na vzorku, druhý na upínací čelisti a třetí přímo na zatěžovacím stroji (viz obr. 3). Rozmístění bylo zvoleno tak, aby bylo možné na základě porovnávací studie příchozích signálů z jednotlivých snímačů eliminovat rušivé zdroje pocházející zejména ze zatěžovacího zařízení RUMUL. Dalším důvodem takto zvolené konfigurace byl fakt, že z důvodu nedostatku místa v okolí měření nebylo možné

upevnit další snímače na vzorek a lokalizovat tak události dle časových zpoždění detekce hitů AE.

Analyzátor XEDO je multi-kanálový systém pro měření, hodnocení signálů AE a lokalizaci zdrojů, který pokrývá frekvenční rozsah 80 až 550 kHz se vzorkovací frekvencí 2 až 8 MHz. Měření parametrů AE není na vzorkování nijak závislé, dojde-li k zastavení vzorkování a přenosu navzorkovaného signálu do PC, neovlivní to žádným způsobem ostatní měření.



Obr. 3 Místa upevnění snímačů AE Fig. 3 Location of AE sensors

2. Podmínky a metodika měření

Pro hodnocení únavového chování v počátečních stádiích zatěžování byly použity dva vzorky z každého směru (L a T - viz obr. 1a). Cyklické zatěžování probíhalo při konstantní amplitudě ohybového napětí 504 MPa (R = -1) až do chvíle, kdy byla objevena trhlina(y). Mikroskopické pozorování bylo provedeno před začátkem měření a pak vždy po 30,000, 60,000, 80,000, 100,000 a 120,000 cyklech. Únavová životnost se při těchto podmínkách pohybovala kolem 1,5 x 10⁵ cyklů. Po celou dobu zatěžování byl snímán signál AE a zaznamenávána rezonanční frekvence zařízení RUMUL, která je závislá na celkové tuhosti zkušebního vzorku. Průměrná hodnota se pohybovala kolem 70 Hz.

Signál ze snímačů AE byl zesílen předzesilovačem (35 dB) a celkový zisk vč. softwarového zesílení činil u každého snímače 55 dB. V softwarové části měřícího systému *Daemon* se provádí veškerá nastavení prahů pro záznam emisních událostí a countů, kmitočtu vzorkování, triggeru a další. Nastavení konfigurace je na obr. 4. Mezi základní sledované parametry AE patřily:

- RMS efektivní hodnota charakterizující energii resp. výkon signálu
- časový průběh hitů AE, jejich energie a frekvenční obraz
- vývoj frekvenčního spektra (v jednotlivých fázích zatěžování)

Cílem bylo pomocí vhodných parametrů nalézt změny v signálu AE, které by mohly reflektovat počáteční přechodová stádia únavového procesu, popisovat odpor materiálu proti cyklické deformaci a iniciaci trhlin.

282

| Zesilovač Zisk: 20 dB Counts rate, Trend a RMS Práh Count1 1 149 % rozsahu Práh Count2 451 % rozsahu HW interval měření: 1000 ms Count průměrování: 1000 ms Count průměrování: 1000 ms Count průměrování: 1000 ms Count průměrování: 15 min ukládání: 17 count 17 trend Rozšířené county Prahy 17 ukládání | Vzorkování Rychlost 2 ▼ MHz Paměť ▼ 5000 slov Pretrigger ▼ 300 slov Perioda ▼ 3000 ms ▼ ukládání Nastavení triggeru ▼ Prahový -> ∑ Začátkem události Externí (sběrnice) ▼ Timeout> ▼ 2 | Události Start ▼ 220 %, r Konec ▼ 220 %, r Mrtvá doba ▼ 288 us Min. délka ▼ 100 us ▼ ukládání 220 %, r. aktivace dalších □ Lokální skupina 000 ms □ Celý box |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dalží pastavení Evport | | |

Obr. 4 Nastavení parametrů pro detekci signálu AE Fig. 4 Experimental setup for AE signal detection

3. Výsledky a diskuze

Na obr. 5 je zobrazen časový průběh signálu AE a rezonanční frekvence zatěžovacího zařízení RUMUL v první fázi měření (po 30 tis. cyklech). Jsou zde vyneseny tyto AE parametry: kumulativní četnost událostí, RMS a energie hitů (pro zjednodušení a přehlednost zde nejsou zobrazeny všechny osy). Zatímco tuhost zkušebního tělesa po celou dobu pozvolna roste, z průběhu RMS a četnosti událostí lze zpozorovat od 8,000 cyklů útlum a konstantní průběh až do konce 1. etapy.



Obr. 5 Průběh signálu AE a rezonanční frekvence zařízení RUMUL po 30 tis. cyklech (směr L, R = -1, σ_a = 504 MPa, N = 30,000 cyklů) Fig. 5 Record of AE signal and resonant frequency of loading device RUMUL (direction L, R = -1, σ_a = 504 MPa, N = 30,000 cycles)

Ve 2. etapě tento trend pokračuje až do cca 50,000 cyklů, kdy se rezonanční frekvence ustaluje a dochází ke zvýšené aktivitě RMS a rapidnímu nárůstu událostí (viz obr. 6). Vzhledem k tomu, že na konci této etapy nebyla zpozorována žádná trhlina, můžeme toto období považovat za 1. stádium - stádium změn mechanických vlastností, mající u většiny materiálů sytící charakter. Tzn., že jsou výrazné pouze na počátku zatěžování a s přibývajícími cykly jejich intenzita klesá, až zcela ustane. Jedná se vlastně o odpor materiálu proti cyklické deformaci.



Obr. 6 Průběh signálu AE a rezonanční frekvence zařízení RUMUL po 60 tis. cyklech (směr L, R = -1, σ_a = 504 MPa, N = 60,000 cyklů)

Fig. 6 Record of AE signal and resonant frequency of loading device RUMUL (direction L, R = -1, $\sigma_a = 504$ MPa, N = 60,000 cycles)

S ohledem na to, že v této práci nebyla provedena žádná detailní analýza, která by verifikovala a posuzovala fázové složení, podmínky žíhání či přítomnost nečistot studované slitiny, nelze explicitně hodnotit mikrostrukturní chování a mechanismy vzniku trhlin v počátečních stádiích zatěžování. Nicméně z jiných odborných prací vyplývá, že mikroplastická deformace u této žíhané slitiny probíhá u hranic zrn α/β , které působí jako překážky proti pohybu dislokací v rovinách skluzu. Mírný nárůst a kolísání parametru RMS v období od 32,000 do 40,000 cyklů může souviset s generováním nových dislokací a jejich vzájemnou interakcí a s interakcí dislokací se strukturními nehomogenitami. V důsledku těchto jevů dochází k tvorbě nových stabilních dislokačních struktur - v případě Ti6Al4V se bude zřejmě jednat o únavové skluzové pásy s velmi vysokou hustotou dislokací.

Prudký nárůst četnosti událostí a zvýšená aktivita RMS od 53,000 cyklů mohou odrážet další interakce dislokací např. s vyloučenými křehkými fázemi (TiH₂, TiC, TiNi₂, apod.), které působí jako iniciační centra při vzniku mikrotrhlin při skluzu po hranicích zrn. Na vznik mikrotrhlin může mít také významný vliv i mezifázové rozhraní. V rovinách maximálního smykového napětí dochází ke vzájemnému pokluzu sousedních rovin a vytváření mikroreliéfu na povrchu vzorku. Ten se nám ale nepodařilo (opticky) zaznamenat. Zejména prohlubeniny (intruze) představují mikrokoncentrátory napětí na povrchu součásti a zároveň zárodky budoucích únavových trhlin.



Obr. 7 Průběh signálu AE a rezonanční frekvence zařízení RUMUL po 80 tis. cyklech (směr L, R = -1, σ_a = 504 MPa, N = 80,000 cyklů) Fig. 7 Record of AE signal and resonant frequency of loading device RUMUL (direction L, R = -1, σ_a = 504 MPa, N = 80,000 cycles)

Až po 100,000 cyklech byla objevena trhlina o velikosti cca 65 µm (viz obr. 8), iniciující z hrany asi 5 mm od nejužší části tělesa. Vzhledem k její velikosti musela nukleovat v oblasti mezi 60,000 a 80,000 cykly (obr. 7). Později byly zjištěny další trhliny iniciující z hrany, avšak tato se stala hlavní (magistrální) vedoucí k lomu tělesa. Po detailní mikroskopické analýze povrchu byly zjištěny na obou hranách (krajích) vzorku relativně rozsáhlé nerovnosti vzniklé po výrobě a úpravě povrchu. Tyto poznatky vedly k názoru, že veškeré známé mechanismy vzniku únavových trhlin v případě tohoto tělesa nemohly být uplatněny, a to z důvodu negativně poznamenané textury povrchu.



Obr. 8 Šířící se trhlina po 100 tis. cyklech Fig. 8 Crack propagation after 100,000 cycles

Stejně jako u předchozích výsledků, tak také zde signál AE zaznamenal inkubační dobu trhliny (67,000 až 80,000 cyklů), čili období mezi iniciací a šířením trhliny, kdy dochází k útlumu emisních událostí a mírnému poklesu RMS. Od začátku 4. etapy (80,000 cyklů) se již šíří hlavní trhlina a při 157,100 cyklech nastává lom tělesa. Jednorázové časové nárůsty signálu - hity AE jsou přehledně zobrazeny v tab. 2. Na základě podobnosti časového průběhu byli vybráni nejčastější zástupci pro každou



Tab. 2 Detekované hity AE v počátečních stádiích zatěžování Table 2 Typical waveform in initial stages of loading

286



sledovanou oblast I až VIII. Vzhledem k tomu, kde byly detekovány hity s vyšší amplitudou (600 – 1500 mV) a energií, lze se domnívat, že jejich příčinou byla kumulace dislokací a interakce se strukturními nehomogenitami a vyloučenými křehkými fázemi. Frekvenční složky, které přenášely maximální výkon signálu, se nejčastěji pohybovaly mezi 165 a 195 kHz. Růst a spojování malých mikrotrhlin, jejich zanikání a interakce s různými překážkami je většinou doprovázeno signály s nižší amplitudou, kratší dobou trvání a frekvencemi kolem 130 kHz (viz VII, VIII). Nejvyšší zastoupení signálů s vyšší amplitudou a delší dobou trvání bylo ve fázi

do 30,000 cyklů. Bohužel se nepodařilo získat dostatečný počet vzorků (zejména v oblasti přechodu ze stádia změn mechanických vlastností a iniciace trhlin) pro vytvoření statistické analýzy změn a vývoje frekvenčních složek signálu. Nicméně časové průběhy vybraných parametrů signálu AE – RMS a četnost událostí a průběh rezonanční frekvence zařízení RUMUL ukazují na velkou citlivost v období kumulace poškození a tvorby povrchového reliéfu. Stádium iniciace trhlin bylo sice AE zachyceno, avšak vlivem výroby a konečné úpravy povrchu tělesa nebylo možné zrealizovat srovnání s mikroskopickým pozorováním.

4. Závěr

Cílem práce bylo využitím metody AE provést podrobnou analýzu únavového chování titanové slitiny Ti6Al4V v raných stádiích zatěžování. Charakter signálu se u všech zkoumaných vzorků zásadně nelišil, a proto směr odběru vzorků z dodaného polotovaru nehrál podstatnou roli. K nukleaci prvních trhlin, které byly v průběhu zatěžování postupně detekovány, docházelo v období ¼ až ½ životnosti tělesa. To bylo ovlivněno především kvalitou a stavem hran v oblasti mělkého vrubu. Za stěžejní výsledky však lze považovat zachycení mikrostrukturálních změn, které nejlépe popisoval parametr RMS a kumulativní četnost událostí. Pro zkvalitnění výsledků a úplnou klasifikaci signálů – hitů AE bude dále zapotřebí věnovat zvýšenou pozornost výrobě a úpravě povrchu vzorků a začlenit do dalších měření také analyzátor IPL, který umožňuje ukládat kontinuální signál a zejména generovat vývojové mapy frekvenčních spekter.

Poděkování

Práce byla vytvořena za podpory projektu TIP MPO ČR FR-TI1/371 "Integrovaný systém průběžného monitorování vybraných strojních uzlů a technologických procesů s využitím akustické emise".

Literatura

- [1] BOYER, R., WELSCH, G., COLLINGS, E. W. *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys.* ASM International, 1994. pp. 1176. ISBN: 978-0-87170-481-8.
- [2] LEYENS, C., PETERS, M. Titanium and Titanium Alloys Fundamentals and Applications. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. pp. 513. ISBN: 3-527-30534-3.
- [3] SEDLÁČEK, V. Únava hliníkových a titanových slitin. SNTL, n.p. Praha, 1989, 351 stran, ISBN 80-03-00180-3.
- [4] KOPEC, B. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2008. str. 571. ISBN 978-807-2045-914.
- [5] BIANCOLINI, M. E., BRUTTI, C., PAPARO, G., ZANINI, A. Fatigue Cracks Nucleation on Steel, Acoustic Emission and Fractal Analysis. *International Journal of Fatigue*. Vol. 28 (2006), pp. 1820 – 1825.
- [6] LEE, CH. K., WILCOX, P. D., DRINKWATER, B. W. Acoustic Emission during Fatigue Crack Growth in Aluminium Plates. In 9th European Conference on Nondestructive Testing 2006. Berlin: DGZfP, 2006. Mo.2.1.5. ISBN 3-931381-86-2.
- [7] AGGELIS, D. G., KORDATOS, E. Z., MATIKAS, T. E. Monitoring of Metal Fatigue Damage Using Acoustic Emission and Thermography. *Journal of Acoustic Emission*. Vol. 29 (2011), pp. 113-122. ISSN 0730-0050.

288