

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Ing. František Vlašic

**HODNOCENÍ CYKlickÉHO POŠKOZENÍ SLITIN NA
BÁZI HLINÍKU A HOŘČÍKU S VYUŽITÍM METODY
AKUSTICKÉ EMISE**

**EVALUATION OF CYCLIC DAMAGE IN
ALUMINUM AND MAGNESIUM ALLOYS USING
ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE**

Zkrácená verze PhD Thesis

Obor: Fyzikální a materiálové inženýrství

Školitel: doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

Oponenti: prof. Ing. Luboš Pazdera, CSc.
prof. RNDr. Jaroslav Fiala, CSc., Feng.
Ing. Jiří Samek, CSc.

Datum obhajoby: 28. 11. 2011

Klíčová slova:

nedestruktivní testování, akustická emise, hliníková slitina, únavový proces, elektronová mikroskopie, rentgenová difrakční topografie

Key Words:

nondestructive testing, acoustic emission, aluminium alloy, fatigue process, electron microscopy, X-ray diffraction topography

Místo pro uložení práce:

Oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně.

© Ing. František Vlašic

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

OBSAH

ÚVOD.....	5
1 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	6
1.1 Únavové vlastnosti hliníkových slitin.....	6
1.2 Faktory ovlivňující únavové chování.....	7
1.3 Aplikace metody AE při únavových zkouškách.....	9
2 INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠNÍ STUDIE	11
3 VYMEZENÍ CÍLŮ DIZERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJICH ŘEŠENÍ	12
4 VÝSLEDKY DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	13
4.1 Popis experimentálního zařízení	13
4.2 Únavová životnost zkoumaných materiálů	13
4.3 Měření signálu AE při únavových zkouškách	16
4.4 Mikroskopická analýza povrchového reliéfu	17
4.5 Rentgenografické zkoumání povrchu vzorku	19
5 DISKUZE	21
6 ZÁVĚR.....	23
7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	25
7.1 Výběr z literatury autora k dané problematice.....	26
8 CURRICULUM VITAE	28

ÚVOD

V současné době patří mezi významné konstrukční materiály (vedle ocelí) především slitiny hliníku, pro jejich velmi výhodné kombinace fyzikálních, mechanických, chemických a technologických vlastností, které umožňují aplikaci hliníkových materiálů téměř ve všech oblastech lidské činnosti. Proto je i nadále nesmírně důležité prohlubovat poznatky o mechanických vlastnostech a procesech porušování těchto materiálů.

V případě statického namáhání součástí, kde dochází obvykle k velkým deformacím (napětí překročilo mez kluzu materiálu), lze tuto trvalou změnu tvaru spolehlivě odhalit a předejít tak závčas lomu součástí. Obdobné varování v případě únavového lomu však chybí. Až 90% poruch kovových součástí ve strojírenské praxi je způsobeno právě tímto jevem, který označujeme jako „únavu materiálu“ [1]. Z tohoto hlediska a vzhledem k nutnosti zachování bezpečnosti zařízení je tedy naprosto nezbytné věnovat významnou pozornost dalšímu prohloubení současných znalostí o mechanických vlastnostech neželezných slitin a jejich případné degradaci.

Díky mnoha vědeckým velikánům 18. a 19. století, jako např. Newton, Fourier, Röntgen či Einstein, kteří nám poskytli bohaté zdroje a matematické vzorce, se postupně vyvinul nový obor - *nedestruktivní zkoušení materiálů*. Zahrnuje metody používané pro zkoušení určitého produktu či materiálu, aniž by se narušila jejich budoucí použitelnost nebo ovlivnila schopnost plnit předpokládanou funkci. V celosvětovém měřítku jsou využívány především proto, aby odhalovaly výkyvy ve struktuře, drobné změny v jakosti povrchu, přítomnost trhlin nebo jiných fyzikálních nesouvislostí.

Od 90. let 20. století se na Fakultě strojního inženýrství, Vysokého učení technického v Brně (dále FSI VUT v Brně) rozvinula jedna z metod nedestruktivního testování (NDT) - *akustická emise* (dále AE), která se zpočátku využívala k identifikaci poškození během zkoušek trvanlivosti radiálních a axiálních ložisek a dále únavových zkoušek v oblasti vysokocyklové únavy - v rámci základního výzkumu. Celá řada experimentů ukázala, že aplikace této metody, v oblasti hodnocení fyzikálních procesů v materiálu, je velmi užitečná s validními výsledky.

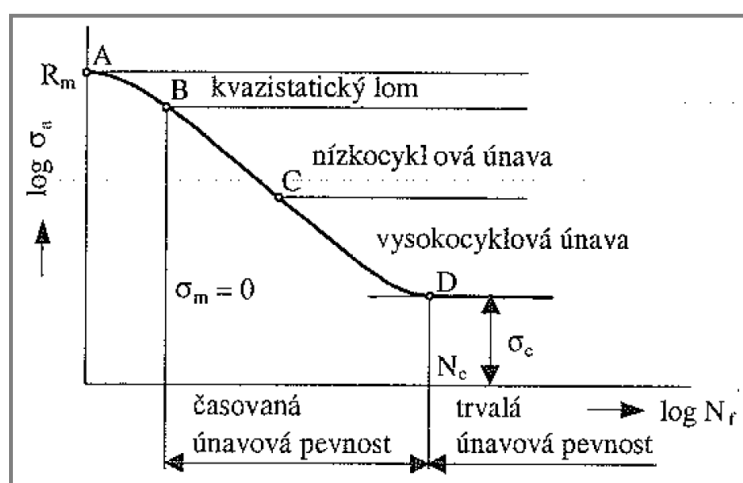
Hlavním pilířem této práce je základní výzkum hodnocení fyzikálních procesů probíhajících v materiálu při únavovém zatěžování neželezných slitin. Stěžejním nástrojem k identifikaci těchto procesů bylo využití metody AE, jejíž výsledky byly dále korelovány s nedestruktivním pozorováním povrchu reálné struktury materiálu (rentgenová difrakce), doplněným o výsledky ze světelné a elektronové mikroskopie a fraktografické analýzy lomových ploch. Cenné informace o aktuálním stavu zkušebního tělesa během únavových zkoušek také pocházely z průběhu rezonanční frekvence vzorku ze zatěžovacího zařízení.

1 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A SHRnutí

SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1.1 ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI HLINÍKOVÝCH SLITIN

Únavové chování materiálu je proces změn strukturního stavu materiálu a jeho vlastností vyvolaný kmitavým (cyklickým) zatěžováním, v důsledku něhož dochází v materiálu k nahromadění (kumulaci) poškození, které se v závěru procesu projeví růstem makroskopické trhliny a únavovým lomem. Při únavovém cyklickém namáhání charakterizujeme odolnost materiálu proti tomuto typu porušení závislostí amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů do lomu N_f . Tato křivka životnosti (Wöhlerova křivka) je experimentálně stanovena při zatěžování s konstantní amplitudou (obr. 1.1).

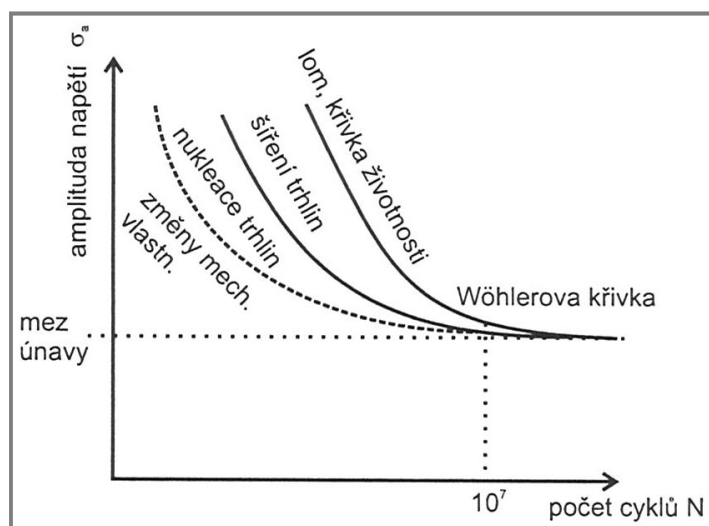


Obr. 1.1 Schematický průběh křivky životnosti $\sigma_a - N_f$ [2]

Na základě typů nevratných změn, způsobených cyklickou plastickou deformací, se většinou celý únavový proces rozděluje na tři časově následující a do jisté míry se překrývající stádia:

- **stádium změn mechanických vlastností** – v důsledku vzniku a kumulace cyklické plastické deformace se mění rozložení a hustota dislokací v materiálu, přičemž tyto nevratné změny probíhají v celém objemu vzorku; materiál mění svoje mechanické vlastnosti, cyklicky změkčuje nebo zpevňuje
- **stádium nukleace trhlín** – v důsledku pokračující kumulace cyklické plastické deformace dochází na povrchu vzorku ke koncentraci napětí, deformaci v okolí koncentrátorů napětí a ke vzniku prvních mikrotrhlín; tento proces je omezen jen na malou část objemu vzorku
- **stádium šíření trhlín** – vzniklé mikrotrhliny neustále rostou, přičemž z důvodu nerovnoměrně rozloženého napětí a deformace se z některé z nich stane trhlina řídící; tato trhlina přeroste značnou část vzorku, zatímco u ostatních trhlín je růst potlačen; při překročení kritického napětí ve zbylé části vzorku dojde k závěrečnému dolomení (únavový lom součásti)

Nicméně dle [3] nebo [4] lze tato základní tři stádia ještě rozšířit např. o stádia vývoje dislokační struktury, lokalizace plastické deformace, vzniku a vývoje povrchového reliéfu, interakce mezi jednotlivými trhlinami či šíření krátkých trhlin. Klasické rozdělení únavového procesu je schematicky ukázáno na obr. 1.2 v diagramu životnosti. Vlastní křivka životnosti (Wöhlerova křivka) sama o sobě reprezentuje konec třetího stádia. Další dvě čáry reprezentují konce předchozích dvou stádií. Jednotlivá stádia plynule přecházejí jedno do druhého a neexistuje mezi nimi žádná zřetelná hranice.



Obr. 1.2 Stádia únavového procesu [3]

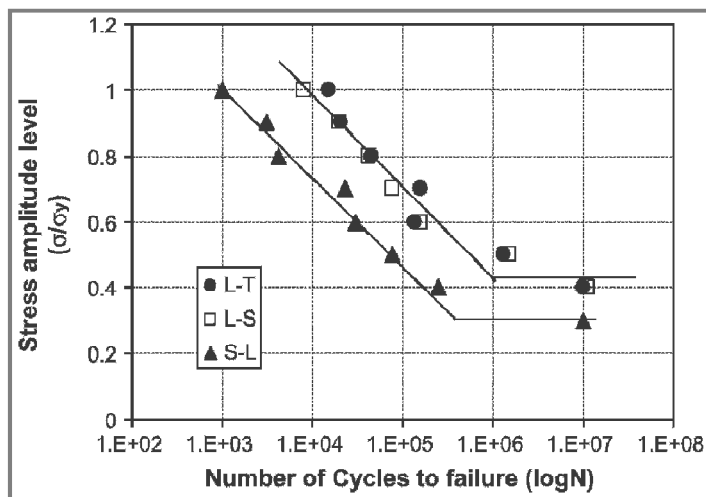
Křivka únavové životnosti u hliníkových slitin má jiný tvar, než je tomu u ocelí. U ocelí lze únavové životy v oblasti počtu cyklů do lomu nad 10^7 cyklů charakterizovat mezí únavy σ_c , tj. napětím, pod kterým již k porušení nedochází. U většiny hliníkových slitin tomu tak není, protože křivka životnosti s klesajícím napětím stále klesá.

1.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ÚNAVOVÉ CHOVÁNÍ

Únavové životy hliníkových slitin závisí také na řadě parametrů. Kromě vlivu chemického složení, stavu tepelného zpracování, způsobu výroby hraje důležitou roli i charakter namáhání, kvalita povrchu, přítomnost vrubů a v případě laboratorního zkoušení i frekvence zatěžování, tvar zkušebních těles, způsob zatěžování a prostředí. Únavové zkoušky jsou charakteristické nejen vlivem velkého počtu různých faktorů, ale i velkým rozptylem výsledků. Díky tomu je porovnávání výsledků únavových zkoušek z různých zdrojů velmi problematické. Vždy je nutné porovnávat takové údaje, které se týkají nejen stejného materiálu (stejný typ výrobku, stejné tepelné zpracování), ale i stejných podmínek zkoušení (frekvence, vrubovitost tyče, typ zatěžovacího cyklu, vlhkost prostředí [1]).

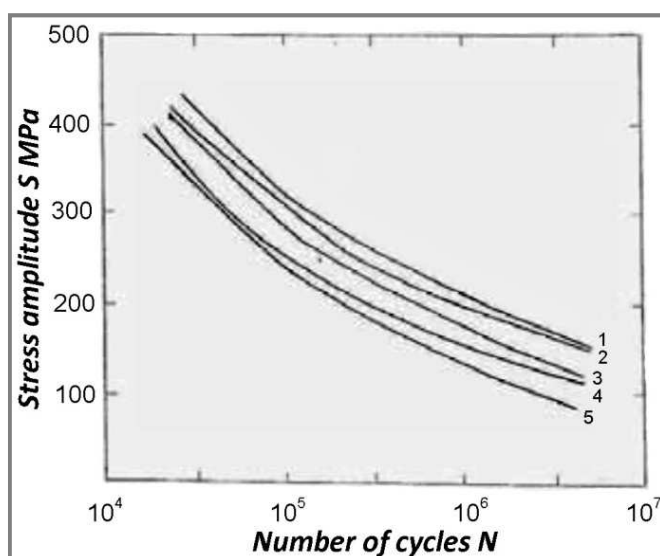
Např. v případě výzkumu nehomogenity či anizotropie struktury vzniklé při průtlačném lisování tvářených Al slitin (vláknitá do směru lisování usměrněná struktura) nebyl za teploty okolí zjištěn významný vliv na únavovou životnost těchto

materiálů, až na případ Al slitiny EN AW-8090 (Al-Li), která byla podrobena únavových zkouškám za čtyřbodového ohybu a pokojové teploty. Zde bylo zjištěno, že únavová pevnost ve směru tváření (L) je vyšší než ve směru příčném (S) v oblasti do 10^7 cyklů ($\sigma_{aL10^7} = 197$ MPa, $\sigma_{aS10^7} = 147$ MPa), což bylo způsobeno právě strukturální nehomogenitou při výrobě polotovaru (obr. 1.3).



Obr. 1.3 S-N křivky ve směru L-T, L-S a S-L při čtyřbodovém ohybu Al slitiny EN AW-8090 (Al-Li) [5]

Na dalším obr. 1.4 je ukázka výsledků výzkumu, který se zabýval vlivem geometrických průřezů zkušebních vzorků na únavovou pevnost. Bylo zjištěno, že s přibývajícím počtem stran v průřezu vzorku mírně roste únavová životnost k vyšším hodnotám. Proto mají vzorky s kruhovým průřezem nejlepší výsledky (nekonečný počet stran).



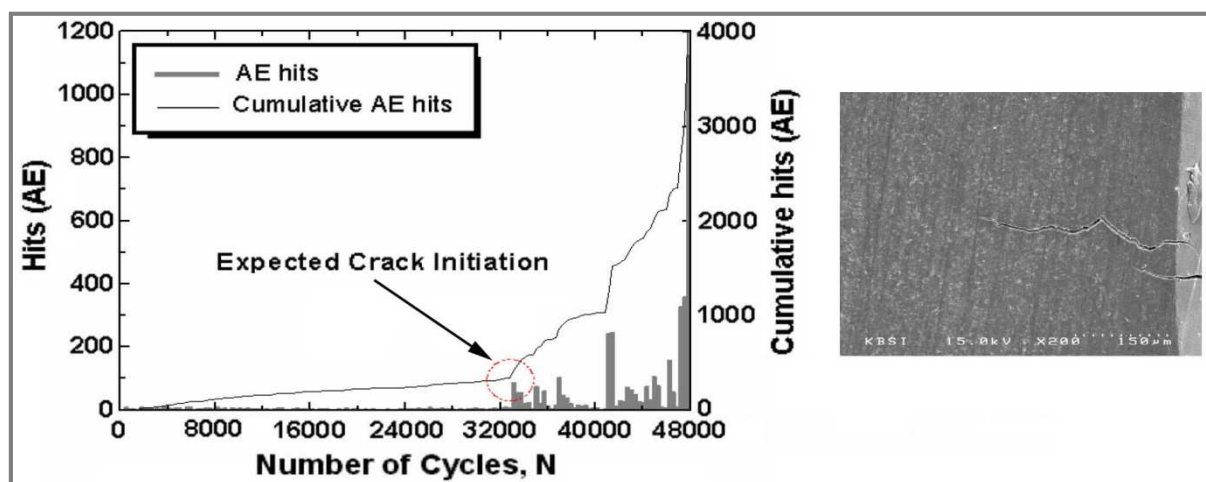
Obr. 1.4 Únavové chování Al slitiny EN AW-6063 za konstantní amplitudy deformace ($\epsilon = 0,001$), 1: kruhový, 2: osmiúhelníkový, 3: šestiúhelníkový, 4: čtvercový a 5: trojúhelníkový průřez [6]

1.3 APLIKACE METODY AE PŘI ÚNAVOVÝCH ZKOUŠKÁCH

Nejdůležitější přínos techniky AE v průmyslu je ten, že může poskytnout včasné varování v případě náhlé poruchy. A právě jedním z nejčastějších případů náhlé poruchy, ke které dochází v provozu, je únavové poškození. AE může závčas detekovat nahromaděné mikropoškození uvnitř materiálu a to za provozních podmínek. 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.) [7].

Hlavní výhoda metody AE (oproti ostatním metodám NDT) spočívá v tom, že dokáže zachytit dynamický proces v materiálu související se strukturální degradací. Tento poznatek se aplikuje především k únavovému hodnocení izotropních materiálů, kde plastická deformace a růst únavové trhliny jsou hlavními zdroji signálů AE. Jedná se zejména o oblast letecké dopravy, kde se metoda AE využívá jako nástroj predikce únavové životnosti konstrukčních materiálů.

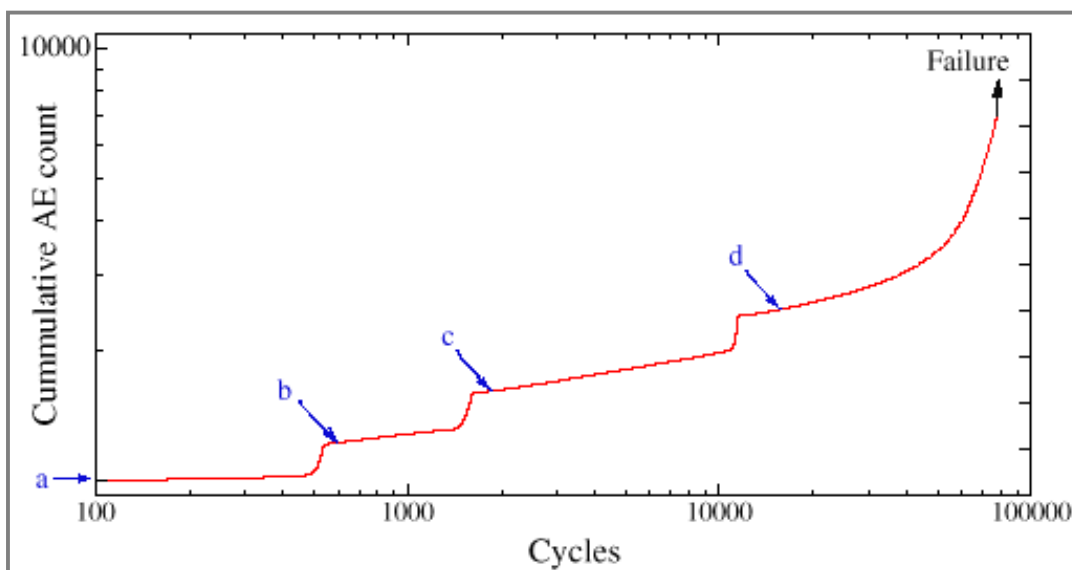
Příklad detekce únavových trhlin, které způsobují především v leteckém průmyslu katastrofické následky, je na obr. 1.5. Cílem zde bylo také poskytnout a doporučit pomocí akustických dat metodiku včasné detekce a šíření únavové trhliny během cyklického zatěžování. Z grafu je zřejmé, že od 33 tisíc cyklů (70 % životnosti vzorku) došlo k významnému nárůstu, který souvisel (díky pozorování na SEM) s iniciací trhliny (obr. 1.5 vpravo).



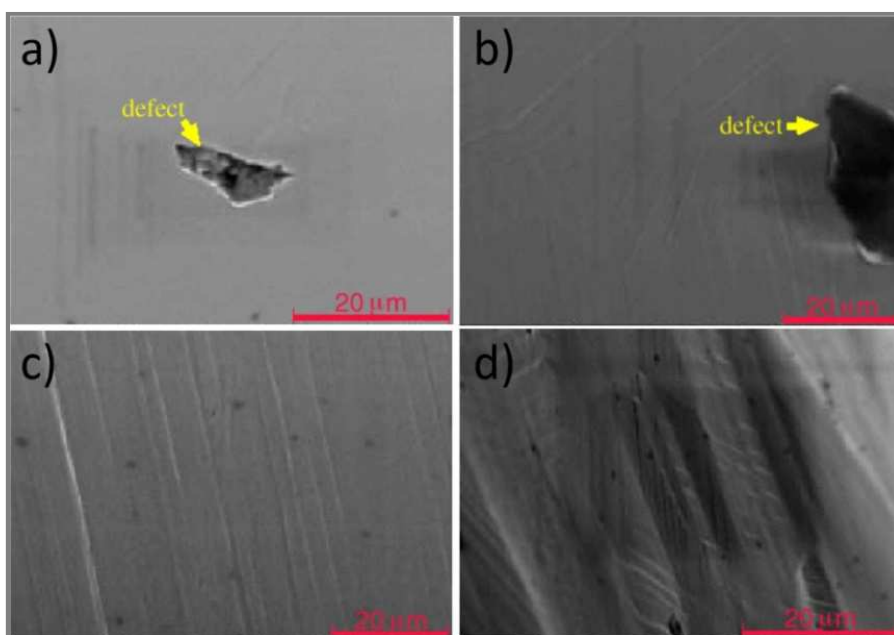
Obr. 1.5 Záznam hitů AE během únavové zkoušky 2024/T351 bez zpevnění povrchu otvoru (vlevo) a detail místa iniciace trhliny (vnitřní strana otvoru) po 33 tis. cyklech (vpravo) [8]

Problematice únavového a lomového chování konstrukčních materiálů, s důrazem na studium detekce jednotlivých fází únavového procesu, se zabývá rozsáhlá práce [9], která je zaměřena zejména na syntézu poznatků aplikace metody AE. Byl zde např. zkoumán povrch leštěných hladkých vzorků pomocí SEM při různých stádiích únavového procesu, během kterého byla zpozorována vysoká aktivita AE. Na obr. 1.6 můžeme vidět několik „skoků“ na křivce kumulativního počtu překmitů (AE countů) v závislosti na počtu cyklů.

Z důvodu zvýšené emisní aktivity byla přibližně po 600 cyklech zkouška pozastavena a vzorek opět přezkoumán. Stejný postup byl opakován po dvou a šestnácti tisíci cyklech (obr. 1.7b, c, d). Bylo zjištěno, že po každém „skoku“, resp. zvýšení emisní aktivity z průběhu na obr. 1.6, skluzové pásy houstly a prohlubovaly se. Nicméně ještě nebylo vyjasněno, jestli se tyto čáry rozvíjejí i v úsecích mezi jednotlivými „skoky“ AE countů.



Obr. 1.6 Proměnlivá aktivita AE během únavové zkoušky superslitiny ULTIMET [9]



Obr. 1.7 Snímky povrchu (SEM) hladkého vzorku superslitiny ULTIMET před zkouškou (a), po 600 cyklech (b), po 2000 cyklech (c) a po 16 cyklech (d) [9]

2 INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠNÍ STUDIE

V oblasti hodnocení cyklického poškození neželezných slitin je upřen zvýšený zájem na výzkum vlivu především mechanických úprav povrchu materiálů, pomocí kterých vytváříme určitou požadovanou jakost a kvalitu povrchu, za účelem vytvořit podmínky pro zvýšení odolnosti proti korozi a opotřebení a zlepšit mechanické (únavové) vlastnosti povrchu. Mezi nejrozšířenější způsoby mechanických úprav povrchu patří broušení, leštění a otryskávání (zpevňování povrchu, např. kuličkováním). K dalším nekonvenčním technologiím povrchových úprav patří např. metody vytvrzování pomocí tepelné úpravy povrchu laserem („Laser surface melting“) nebo rázové vlny („Laser shock processing“).

Jak už bylo několikrát prokázáno, únavové životy (hliníkových slitin) závisí na řadě parametrů, jako např. stavu tepelného zpracování, způsobu výroby, charakteru namáhání, kvalitě povrchu a v případě laboratorního zkoušení i na frekvenci zatěžování, tvaru zkušebních těles či způsobu zatěžování. Z rešeršní studie bylo např. prokázáno, že ošetřování povrchu kuličkováním vede ke zvyšování únavové životnosti materiálu především ve vysokocyklové oblasti. Toto zlepšení lze připsat zejména zbytkovému tlakovému napětí v povrchové vrstvě. Dále v případě výzkumu nehomogenity či anizotropie struktury vzniklé při průtlačném lisování tvářených Al slitin (vláknitá do směru lisování usměrněná struktura) nebyl za teploty okolí zjištěn významný vliv na únavovou životnost, až na případ Al slitiny EN AW-8090 (Al-Li), která byla podrobena únavových zkouškám za čtyřbodového ohybu a pokojové teploty (obr. 1.3).

Hlavní zaměření této práce je na aplikaci metody AE při únavových zkouškách především Al slitin, kterou v současné době využívá ve světě stále více lidí v oblasti nedestruktivního testování, a to díky jejímu jedinečnému náhledu do procesu poškozování. Nejdůležitější přínos techniky AE v průmyslu je ten, že může poskytnout včasné varování v případě náhlé poruchy.

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. Můžeme říci, že většina těchto prací je zaměřena jen na úzkou oblast nebo stádium únavového procesu, která je detailně rozpracována.

Existuje také omezený počet prací, které mapují metodou AE celý proces únavové degradace materiálu, tzn. od prvních zátěžných cyklů až po lom součásti. Výsledky z takto zaměřených výzkumů sloužily jako základní studijní zdroj informací, které byly využity v předkládané dizertační práci, která na celou problematiku navazuje a rozšiřuje ji o další přístupy.

Z výše uvedených poznatků lze usoudit, že obor nedestruktivního testování materiálů může zásadním způsobem odkrýt proces únavového poškozování a prohloubit dosavadní znalosti v této oblasti.

3 VYMEZENÍ CÍLŮ DIZERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJICH ŘEŠENÍ

Na základě rešeršní studie z oblasti hodnocení cyklického poškozování materiálů byly s využitím konvenčních záznamů zatěžovacího únavového zařízení (jako např. rezonanční frekvence zkušební vzorku, S-N závislosti, popř. hysterezní smyčky) a zejména NDT metod vymezeny hlavní cíle dizertační práce:

- výzkum únavových vlastností tvářených Al slitin EN AW-6082/T6, EN AW-7075/T6 a EN AW-2017A/T4, u kterých bude zkoumán vliv směrovosti struktury (anizotropie), tvaru zkušebních vzorků a způsobu zatěžování
- aplikace metod NDT (AE, RTG difrakční topografie a rastrovací elektronová mikroskopie) jako nástrojů k bližší identifikaci strukturních změn a vzniku poškození Al slitin se směrově orientovanou strukturou v průběhu jejich cyklického zatěžování

Experimentální únavové zkoušky v ohybu budou probíhat na zatěžovacím elektrezonančním pulzátoru RUMUL Cracktronic za podmínek střídavého symetrického cyklu ($R = -1$) a teploty okolí. Pro vzájemnou komparaci výsledků tohoto typu zatěžování bude využít za spolupráce Ústavu materiálových věd a inženýrství (ÚMVI) FSI v Brně servohydraulický systém INSTRON a pulzátor AMSLER (cyklický jednoosý tah-tlak).

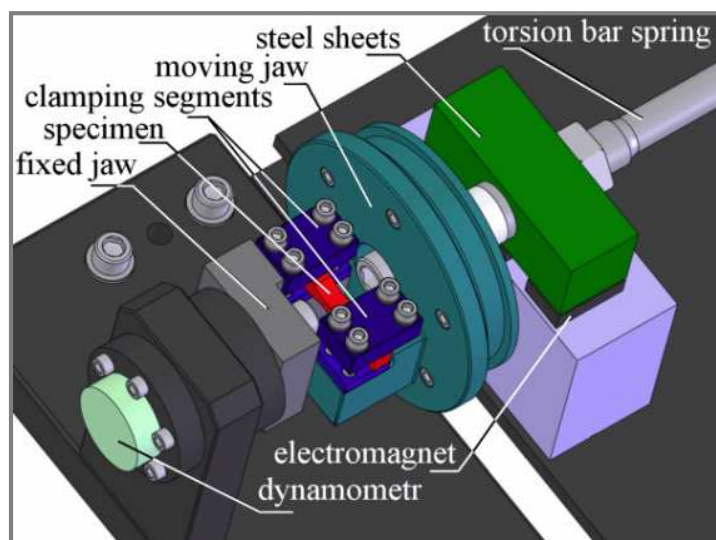
Během těchto zkoušek bude monitorován průběh rezonanční frekvence vzorku (zkušební zařízení RUMUL) a pro zpřesnění a identifikaci strukturních změn v materiálu bude měřen během celého života vzorku „in situ“ signál AE. Výsledky z těchto měření budou dále korelovány s difraktogramy rentgenografického pozorování povrchu materiálu. Ve spolupráci s ÚMVI bude ještě celá metodika obohacena o fraktografické analýzy, které mohou poskytnout další informace o průběhu celého únavového procesu, a snímky z rastrovací elektronové mikroskopie (SEM).

Hlavní přínos této práce spočívá především v přístupu a metodice hodnocení cyklického poškozování materiálů. Většina vědeckých pracovišť má pouze omezený přístup k metodám řešení daného problému. Proto další výhodou a přínosem této práce byla možnost verifikace validity naměřených dat s ostatními nedestruktivními technikami, jako např. RTG topografií ve spolupráci se Západočeskou univerzitou v Plzni, která vlastní unikátní difraktometr D8 Discover firmy AXS Bruker s velkoplošným plynem plněným proporcionalním detektorem.

4 VÝSLEDKY DIZERTAČNÍ PRÁCE

4.1 POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ

Základem celé metodiky zkoušení byly únavové zkoušky, probíhající v oblasti vysokocyklové únavy (obr. 4.1). Při těchto zkouškách byl pomocí několika typů analyzátorů současně měřen signál AE (obr. 4.2) a pro objasnění zjištěných změn v průběhu měření byla vybraná zkušební tělesa podrobena rentgenografickému a mikroskopickému pozorování na ÚMVI v Brně a externím pracovišti v Plzni.



Obr. 4.1 Základní komponenty zařízení Cracktronic (upraveno pro únavové zkoušky v ohybu) [10]

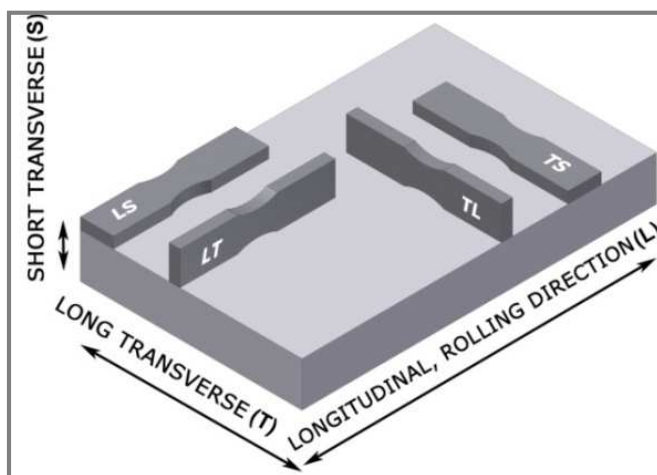


Obr. 4.2 Měřicí systém Xedo (zpracování signálu AE)

4.2 ÚNAVOVÁ ŽIVOTNOST ZKOUMANÝCH MATERIÁLŮ

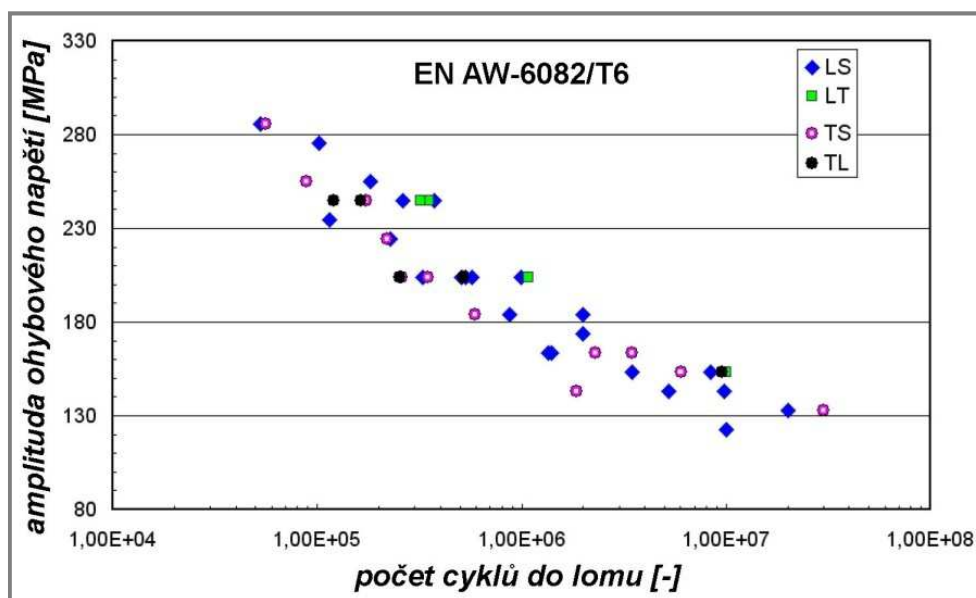
Polotovar na zkušební tělesa byl vyroben protlačováním. Vlivem této technologie výroby vykazuje struktura významnou nehomogenitu (směrnost). Proto byly

vyrobena čtyři sady vzorků odpovídající směřům LS, TS, LT a TL (L - podélný, ve směru tváření, T – příčný a S ve směru tloušťky polotovaru). Smluvní označování směřů je zobrazeno schematicky na obr. 4.3.



Obr. 4.3 Smluvní označování směřů při výrobě zkušebních vzorků pro únavové zkoušky

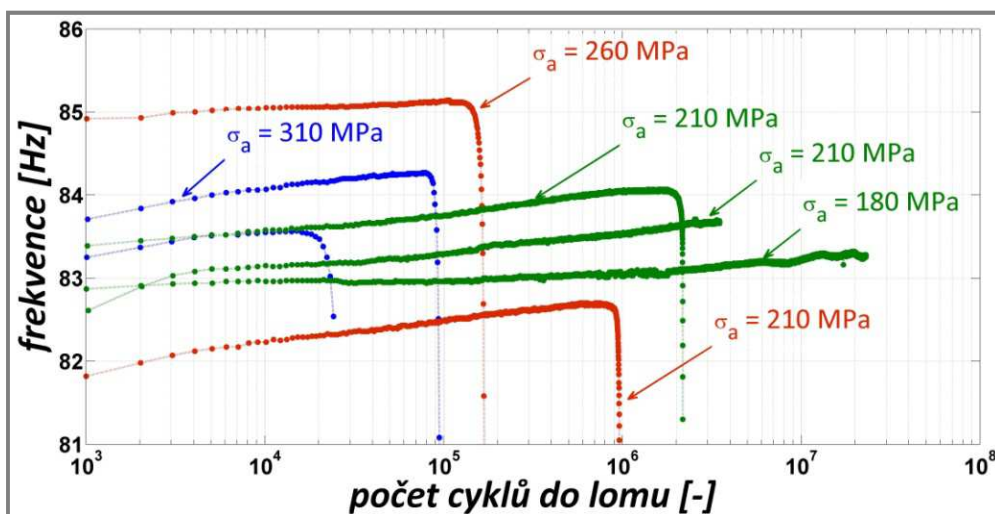
V rámci hodnocení směřovosti struktury byly výsledky únavových zkoušek vyhodnoceny formou S-N závislostí experimentálních bodů (obr. 4.4). Je zřejmé, že vliv směru odběru zkušebních těles s orientací L a T Al slitiny 6082/T6 je velmi malý a dá se zahrnout do společného rozptylového pásma. Nicméně u slitiny 7075/T6 byla zjištěna mírně zvýšená únavová odolnost ve směru LT, tedy ve směru protlačování.



Obr. 4.4 S-N závislosti slitiny 6082/T6 ve čtyřech směřech (R = -1, zatěžování: střídavý ohyb, teplota okolí) [11]

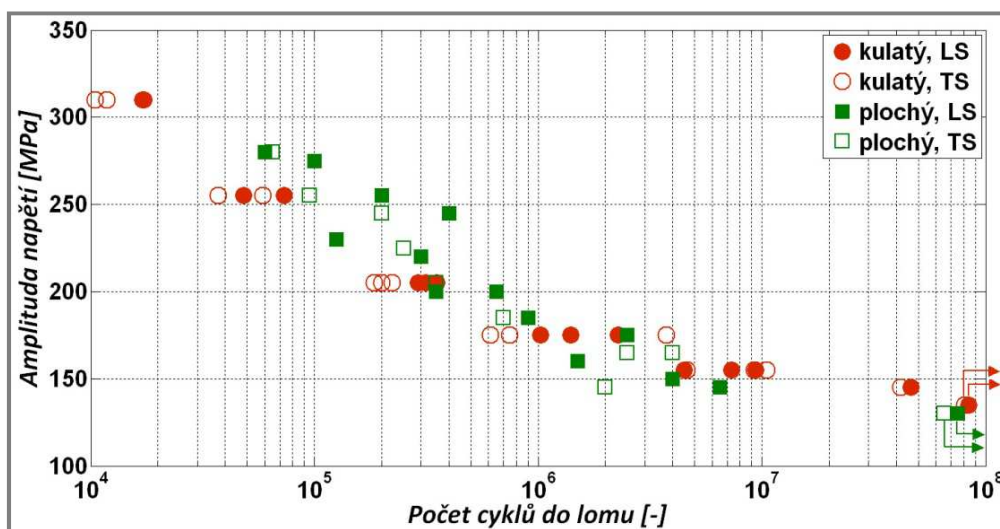
Na obr. 4.5 jsou vyneseny křivky rezonančních frekvencí slitiny 7075/T6 v rozmezí od 180 do 360 MPa při symetrickém cyklu. Z grafu je zřejmé, že při

snižující se amplitudě ohybového napětí roste „náběh“ (úsek od počátku zkoušky po max. hodnotu) rezonanční frekvence. Tyto závěry daly podnět k výzkumu vlivu náběhu na směrovost struktury.



Obr. 4.5 Průběhy rezonančních frekvencí vzorků 7075/T6 při symetrickém cyklu ($R = -1$) a amplitudách napětí v rozmezí 180 až 360 MPa

Při výzkumu geometrie zkušebních těles na únavovou životnost Al slitin bylo zjištěno, že příčný profil námi zvolených tří typů vzorků nemá zásadní vliv na naměřené charakteristiky únavového chování Al slitiny 6082/T6 (obr. 4.6). Výsledky jsou plně srovnatelné a je tedy možné vzorky s plochým průřezem nahradit vzorky s kruhovým průřezem funkční plochy, které jsou z hlediska místa iniciace trhliny vhodnější pro únavové zkoušky.

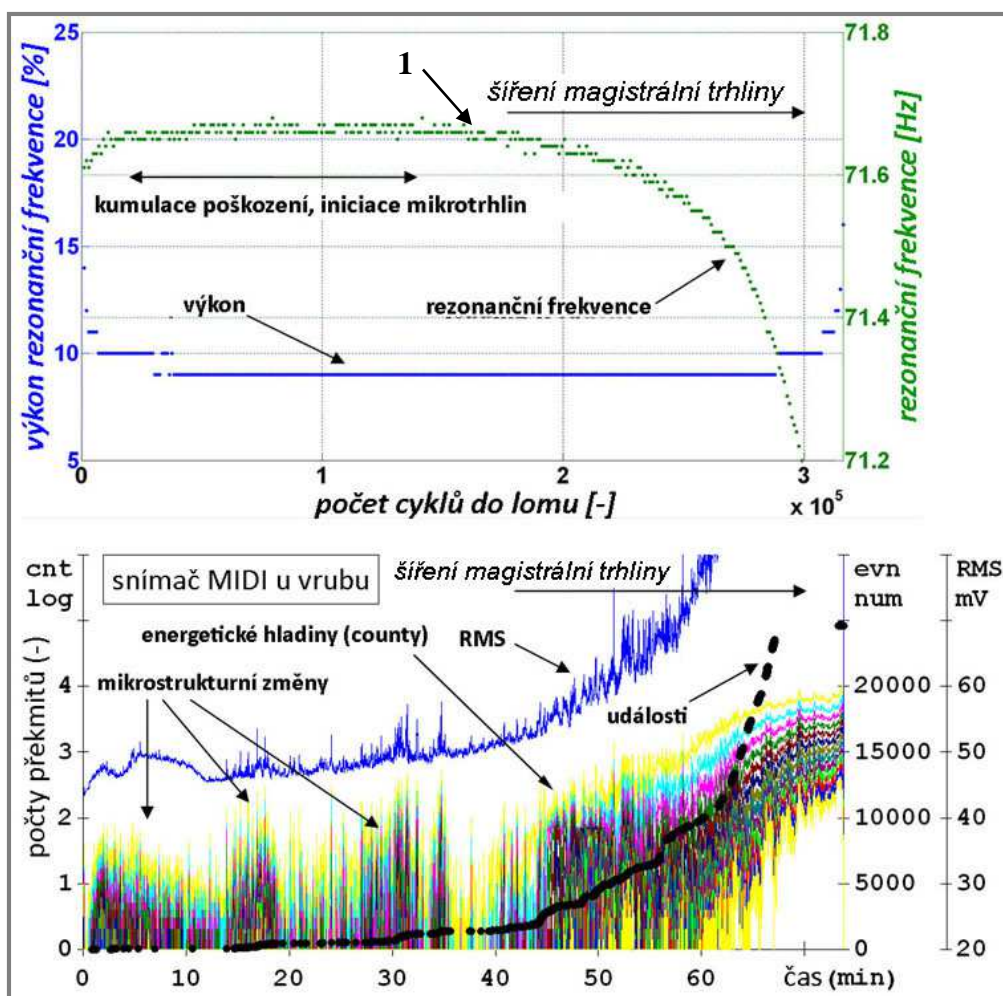


Obr. 4.6 S-N závislosti slitiny 6082/T6 s obdélníkovým a kruhovým průřezem vzorku [12]

4.3 MĚŘENÍ SIGNÁLU AE PŘI ÚNAVOVÝCH ZKOUŠKÁCH

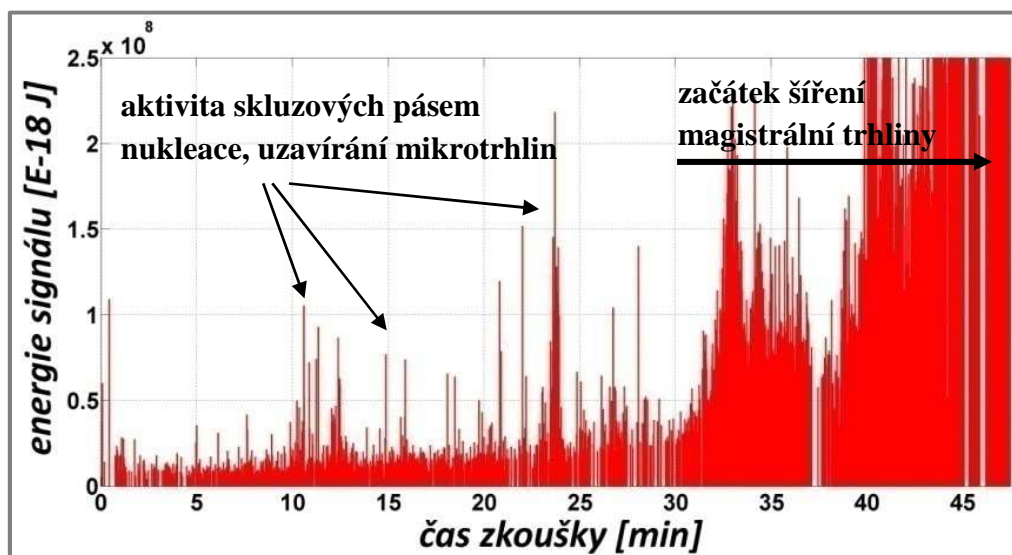
Dizertační práce je zaměřena na využití metod NDT (zvláště metody AE) v oblasti cyklického poškozování materiálů, pomocí kterých lze zaznamenat v průběhu experimentální zkoušky stádia únavového procesu a do jisté míry predikovat zbývající životnost dané součásti. Naměřená data z těchto metod jsou dále korelována s poznatky (průběhy) explicitně naměřených konvenčních parametrů, získaných během únavových zkoušek (kapitola 4.2), např. se záznamem rezonanční frekvence nebo křivky cyklického zpevnění-změkčení.

Ukázka typického záznamu sledovaných parametrů AE včetně záznamu rezonanční frekvence vzorku ze zatěžovacího zařízení RUMUL je na obr. 4.7. Ze záznamu signálu AE můžeme vypočítat místa, která vykazují zvýšenou aktivitu ve stádiu iniciace trhlin (v záznamu 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 nebo na hranicích zrn. Nicméně identifikovat příčinu vzniku únavových mikrotrhlin na základě signálu AE zatím není možné.



Obr. 4.7 Záznam rezonanční frekvence (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)

Z jiné únavové zkoušky na obr. 4.8 lze také vykreslit průběh energie signálu AE, kde se ze začátku zkoušky a v úseku od 11. až do 18. minuty vyskytují události, na osciloskopu generované hity AE, které obsahují daleko větší objem uvolněné energie než v okolních případech. To může právě např. upozorňovat na „skrytá místa“ růstu či prohlubování únavových skluzových pásem, spojená s nukleací či uzavíráním mikrotrhlin (popř. mikrodutin), která jiné parametry AE nedetekovaly.



Obr. 4.8 Energie signálu AE během únavové zkoušky v ohybu (Al slitina 2017A/T4, $\sigma_a = 235$ MPa, $N_f = 101\,900$ cyklů, symetrický cyklus)

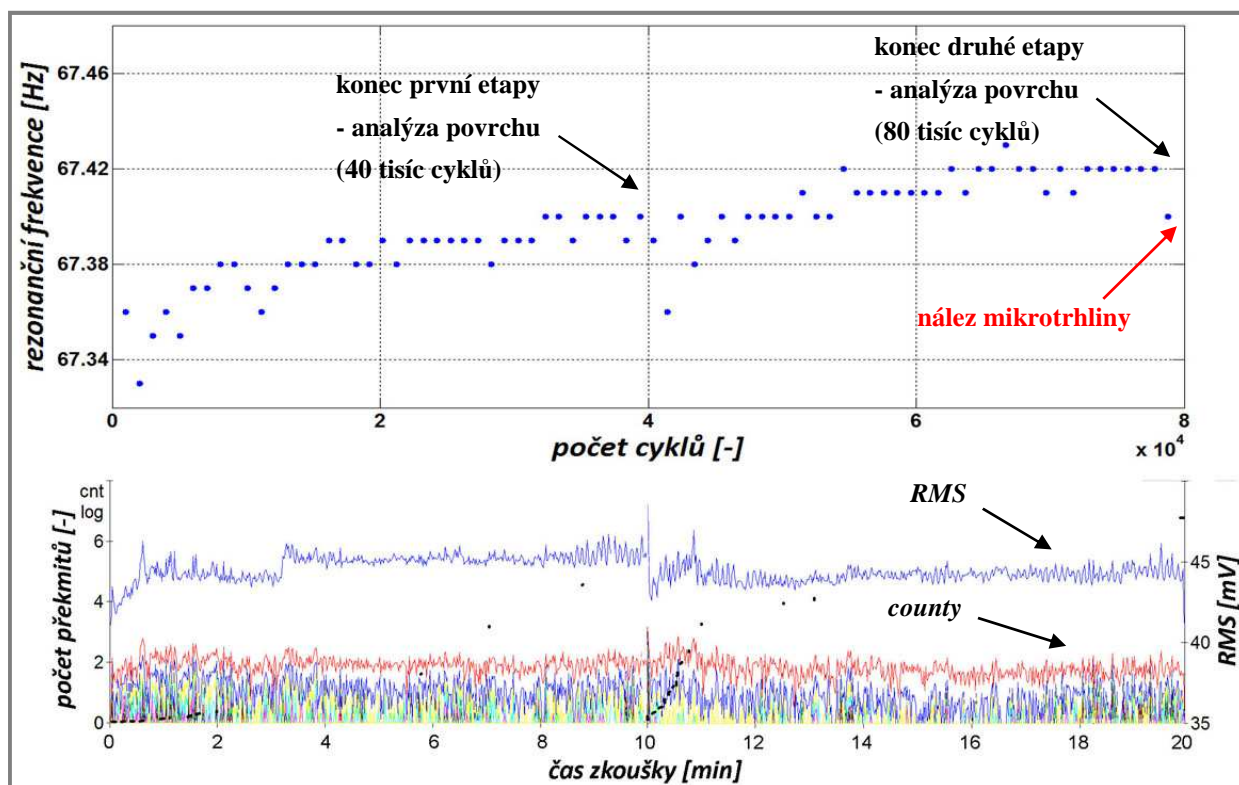
4.4 MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA POVRCHOVÉHO RELIÉFU

Tato část výzkumu byla realizována zejména z důvodu ověření hypotézy o začátku šíření magistrální trhliny z průběhu rezonanční frekvence vzorku ze zařízení RUMUL, kdy dochází v její závěrečné části k viditelnému poklesu (např. na obr. 4.7 nahoře kolem $1,72 \times 10^5$ cyklů). Cílem tedy bylo zjistit, jak charakter tohoto průběhu úzce souvisí s aktuálním stavem cyklicky degradovaného vzorku. Další snahou bylo při těchto experimentech odhalit lokální místa ovlivněná plastickou deformací, kde vznikají koncentrátoři napětí a první mikrotrhliny.

Testovaným materiálem byla Al slitina 2017A/T4, která byla cyklována na pulzátoru RUMUL až do lomu při amplitudě napětí 235 MPa a symetrickém cyklu. Během měření byl ukládán průběh rezonanční frekvence a signál AE. Snímače AE byly umístěny s ohledem na sledovaná místa na konci vzorku. Ze signálu AE se sledovaly především počty překmitů (county), RMS, celkový (kumulativní) počet hitů událostí AE, max. amplituda a energie hitu AE.

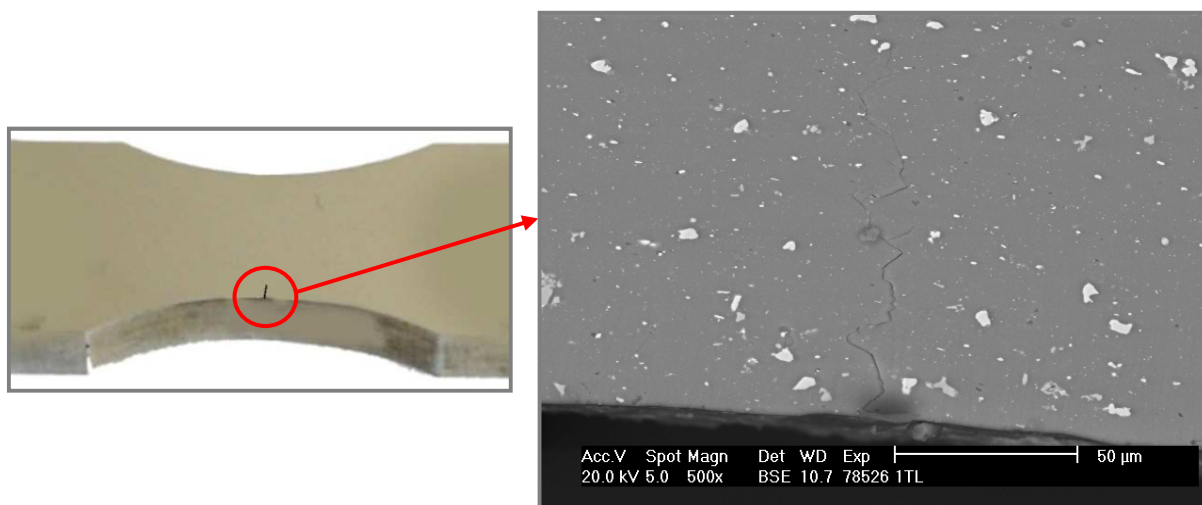
Po každých 40 tisíci cyklech byla zkouška přerušena a testované vzorky odeslány na mikroskopické pozorování (celkem byly vyšetřovány 2 vzorky ve směru TL s označením 1TL, 3TL). Záznam rezonanční frekvence vzorku a signálu AE z první a druhé fáze (80 tisíc cyklů) cyklování je na obr. 4.9. V průběhu první a druhé etapy dochází k mírnému růstu rezonanční frekvence, přičemž aktivita signálu AE (county

a parametr RMS) zůstává až na několik oblastí, např. mezi 6. a 7. minutou, 13. a 14. minutou a 18. až 20. minutou, v klidném (ustáleném) stavu.



Obr. 4.9 První a druhá fáze cyklování metalograficky upraveného vzorku, záznam rezonanční frekvence (nahore), signálu AE (dole) z únavové zkoušky v ohybu (Al slitina 2017A/T4, symetrický cyklus, $\sigma_a = 235$ MPa, $N = 80\,000$ cyklů)

Mikroskopické pozorování inkriminovaných míst na povrchu vzorků neodhalilo při daném zvětšení po 40 tisíci cyklech žádné viditelné změny ani existenci mikrotrhlín. Naopak už po 80 tisíci cyklech byla na obou zkušebních tělesech zpozorována v nejužším místě šířící se mikrotrhlina, viz obr. 4.10.



Obr. 4.10 Lokalizace první mikrotrhliny na vzorku 1TL (vlevo) a její detail (vpravo) po 80 tisíci cyklech

Závěr z této části výzkumu je ten, že okamžik počátku klesajícího trendu rezonanční frekvence zařízení RUMUL (např. bod 1 na obr. 4.7) neznamená začátek šíření magistralní trhliny, jak bylo původně uvažováno, ale až období nekystalografického šíření trhliny končící náhlým lomem. Z toho vyplývá, že vznik a začátek šíření magistralní trhliny probíhá už daleko dříve než v uvažovaném momentu poklesu frekvence, na což také částečně upozorňoval signál AE zejména amplitudou a energií hitů AE.

4.5 RENTGENOGRAFICKÉ ZKOUMÁNÍ POVRCHU VZORKU

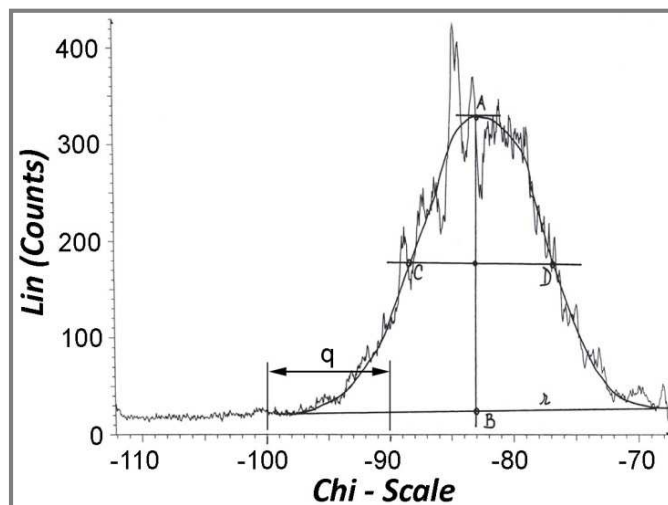
Dosavadní pozornost byla věnována především aplikacím metody AE na rezonančních únavových strojích. Byla prokázána částečná shoda mezi změnami frekvence zatěžování na zařízení RUMUL, nárůstem signálu AE a vznikem a šířením magistralní únavové trhliny. Samozřejmě metoda AE reagovala podstatně citlivěji a dříve než analýza změn rezonanční frekvence zatěžování. Nicméně standardní záznamy AE poukazovaly na existenci zdrojů signálu AE i v etapách změn mechanických vlastností a nukleace trhlín. Nicméně zjistit primární příčinu vzniku signálů v těchto etapách je velmi obtížné, neboť samotná metoda AE informuje o existenci, nikoliv však o podstatě zdroje. Proto byla využita pro objasnění příčiny zvýšené emisní aktivity v těchto stádiích elektronová mikroskopie a RTG difrakce. První jmenovaná byla přínosná zejména při hodnocení počátku šíření magistralní trhliny, což bylo popsáno v předchozí kapitole. Avšak k vysvětlení existence zdrojů AE v inkriminovaných stádiích nevedla. K objasnění možných strukturních změn v materiálu byla dále využita RTG difraktografie kolegů ze Západočeské univerzity v Plzni.

V rámci plošných poruch vede tendence snižování vnitřní energie krystalu, obsahujícího dislokace, k uspořádávání dislokací do dislokačních stěn, vytvářející tzv. *mozaikovou strukturu (blok) krystalu*, v oblasti elektronové mikroskopie *blok (subzrno)*. V obou případech jde o části krystalu se zanedbatelnou hustotou dislokací, vzájemně oddělené dislokační stěnou. Velikost těchto bloků, jejich orientace a tvar má velký vliv na dynamiku procesů, ke kterým dochází v průběhu cyklické degradace materiálu [3].

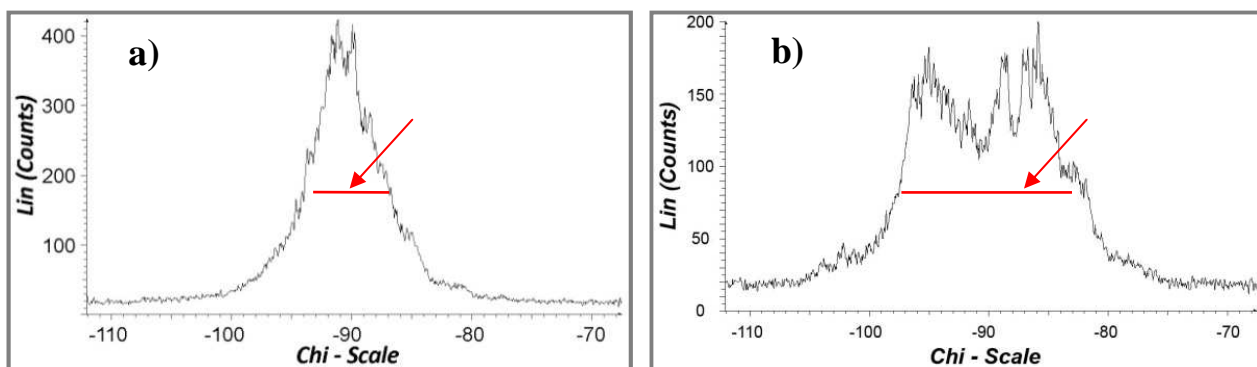
Hlavním zobrazovacím parametrem při rentgenografickém pozorování povrchu cyklicky zatěžovaného vzorku (mimo azimutální profily a samotné difraktogramy) byla hodnota K , která reprezentuje míru dizorientace bloků mozaikové struktury, viz obr. 4.11.

Další obr. 4.12 dokumentuje vývoj šířky p (úsečky CD na obr. 4.11) na sériích azimutálních profilů difrakční linie zkoumaného materiálu ve směru TL od 50 do 60 tisíc cyklů. Ukázky těchto periodických strukturních změn (střídavé rozšiřování a zužování směrové distribuce mozaikových bloků), vyvolaných cyklickým ohybovým zatěžováním, byly u vzorku ve směru TL znatelné zejména od cca 25 tisíc cyklů až do lomu tělesa, viz graf na obr. 4.13. Je zde zvláště období od 50 do 70 tisíc cyklů, dokumentované vývojem azimutálních profilů z obr. 4.12.

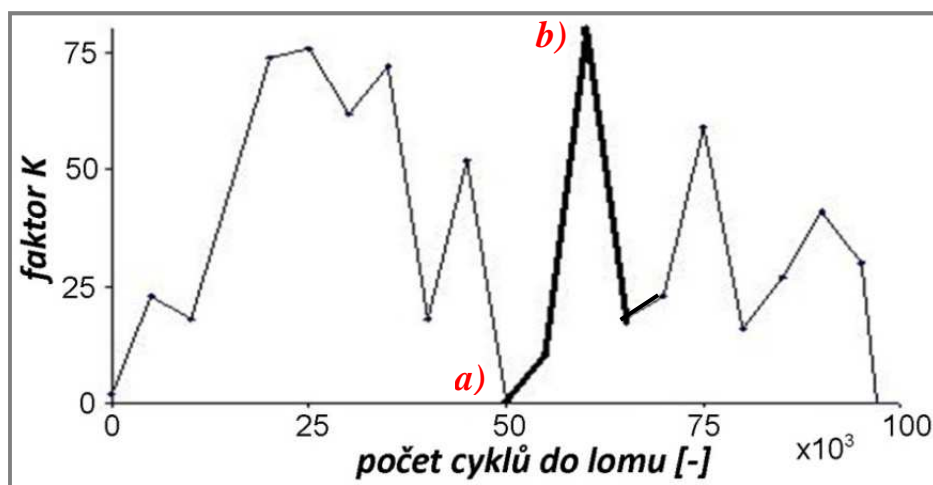
Výsledky nedestruktivního pozorování struktury pomocí RTG topografie naznačují, že změny, ke kterým dochází po úvodní „náběhové části“ až do lomu vzorku, mohou korelovat se změnami v signálu AE např. na obr. 4.7 v 16. a 30. minutě.



Obr. 4.11 Konstrukce hodnoty K (míra dizorientace bloků mosaikové struktury) [13]



Obr. 4.12 Azimutální profily difrakčních linií Al slitiny AW-2017A/T4 po 50 tis. cyklech (a) a po 60 tis. cyklech (b) při $\sigma_a = 210$ MPa, $R = -1$, směr TL



Obr. 4.13 Závislost faktoru K , charakterizující směrovou distribuci mosaikových bloků, na počtu cyklů do lomu (Al slitina 2017A/T4, směr TL, $\sigma_{ahyb} = 210$ MPa, $R = -1$); a, b – azimutální profily z obr. 4.12

5 DISKUZE

Dizertační práce shrnuje základní poznatky a nejnovější výsledky výzkumů z oblasti hodnocení cyklického poškozování konstrukčních materiálů a využití metod NDT v materiálovém inženýrství. Na základě rešeršní studie, která je obsažena v první kapitole, byly vymezeny cíle předkládané dizertační práce na základní výzkum únavových vlastností tvářených Al slitin EN AW-6082/T6, EN AW-7075/T6 a EN AW-2017A/T4, u kterých byl zkoumán vliv směrovosti struktury (anizotropie), tvaru zkušebních vzorků a způsobu zatěžování společně s průběhem rezonanční frekvence zatěžovacího zařízení RUMUL. Hlavní cíl práce je zaměřen na aplikaci metod NDT (AE, RTG difrakční topografie a rastrovací elektronová mikroskopie) jako nástrojů k bližší identifikaci strukturních změn a vzniku únavového poškození u sledovaných Al slitin se směrově orientovanou strukturou. Experimentální část pak na celou problematiku navazuje a rozšiřuje ji o další přístupy a poznatky.

Na základě rešeršní studie bylo zjištěno, že směrová nehomogenita tvářených Al slitin nemá při pokojové teplotě zásadní vliv na únavové vlastnosti. To bylo také částečně potvrzeno experimenty v této práci. Výsledky únavových zkoušek v ohybu slitiny 6082/T6 ukazují, že vliv směru odběru vzorků zkušebních těles s orientací L (směr protlačování) a T (příčný směr) je velmi malý a dá se zahrnout do společného rozptylového pásma (obr. 4.4). Naproti tomu u slitiny 7075/T6 byla především při vyšších životnostech zjištěna mírně zvýšená únavová odolnost ve směru LT, tedy ve směru protlačování s trhlinou šířící se ve směru T. Tyto rozdíly v jednotlivých směrech jsou pravděpodobně spojeny s odlišným charakterem šíření únavové trhliny a mohou sehrát jistou roli při výběru konstrukčního materiálu pro praktické využití, nicméně vliv není rozhodující.

Vzhledem k tomu, že i v současné době používá řada výzkumných pracovišť jiných zkušebních tyčí, než je doporučováno normou (u nás ČSN 42 0363 nebo ČSN 42 0368), byl proveden výzkum vlivu geometrie zkušebních těles na únavovou životnost, který se především projevuje na makroskopické rychlosti růstu trhliny. Např. práce [6] se zabývá vlivem geometrických průřezů zkušebních vzorků Al slitiny AW-6063 na únavovou pevnost. Výsledky naznačují, že s přibývajícím počtem stran v průřezu vzorku roste únavová životnost k vyšším hodnotám, viz obr. 1.4. Experimentální zkoušky dizertační práce však tuto hypotézu v případě Al slitiny 6082/T6 nepotvrdily. Po rozšíření metodiky zkoušení ještě o vzorky s kruhovým průřezem bylo zjištěno, že při únavovém ohybovém zatěžování nedošlo ani změnou geometrie tělesa k významné změně. Výsledky jsou plně srovnatelné a je tedy možné vzorky s plochým průřezem nahradit vzorky s kruhovým průřezem funkční plochy, které jsou z hlediska místa iniciace trhliny vhodnější pro únavové zkoušky.

Neméně zajímavé bylo také pozorování středních hodnot náběhů rezonanční frekvence zatěžovacího zařízení RUMUL u sledovaných slitin ve směru L a T. Z výsledků je patrné, že slitina 7075/T6 má výrazně vyšší střední hodnoty náběhů v obou směrech oproti 6082/T6, u které se tato hodnota významně neliší. Tyto

poznatky mohou korelovat s výsledky měření hysterezních smyček, při kterých 6082/T6 spíše změkčuje nebo je cyklicky stabilní a 7075/T6 spíše zpevňuje.

V další části práce jsou obsaženy výsledky měření signálu AE při únavových zkouškách v ohybu, zaměřené zejména na výběr parametrů AE, které by vhodně popisovaly projevy cyklické plastické deformace v materiálu. Je zde také začleněn přínosný vliv průběhu rezonanční frekvence zatěžovacího zařízení, z kterého lze vypočítat okamžik začátku (nekystalografického) šíření trhliny. Stádium šíření trhlín, především pak šíření magistrální trhliny, se podařilo ve všech případech detekovat s dobrou vypovídající hodnotou společně se záznamem rezonanční frekvence vzorku zatěžovacího zařízení RUMUL. Bylo zjištěno, že signál AE upozorňoval spolehlivě ve všech případech na počátek šíření magistrální trhliny daleko dříve, než elektrozvukový pulzátor se svým záznamem rezonanční frekvence. Dále se podařilo nalézt takové parametry AE, pomocí kterých je možné v těchto stádiích identifikovat nepatrné změny ve struktuře, které jsou projevem cyklické degradace materiálu. Jednalo se především o parametry: RMS, maximální amplitudy a energie hitů událostí AE. Další pokrok ve výzkumu vhodných AE parametrů je také očekáván od měřicího systému *IPL*, popř. sestavy přístrojů *Xedo-IPL-AE switch*, které jsou v současné době ve fázi testování. Nicméně popsat konkrétní druh změn pomocí AE dat je zatím v současné době touto technikou velmi složité a spekulativní.

Hlavním závěrem části týkající se mikroskopického pozorování povrchu cyklicky zatěžovaných vzorků je poznatek, že okamžik počátku klesajícího trendu rezonanční frekvence zařízení RUMUL (např. bod 1 na obr. 4.7) neznamena začátek šíření magistrální trhliny, jak bylo původně uvažováno, ale až období nekystalografického šíření trhliny končící náhlým lomem. Z toho vyplývá, že vznik a začátek šíření magistrální trhliny probíhá už daleko dříve než v uvažovaném momentu poklesu frekvence, na což také částečně upozorňoval signál AE zejména amplitudou a energií hitů AE.

Poslední část práce se zabývá výzkumem povrchu cyklicky zatěžovaného materiálu pomocí RTG difrakce, která zaznamenala po úvodní „náběhové části“ periodické strukturní změny střídavým rozšiřováním a zužováním směrové distribuce mozaikových bloků, viz obr. 4.12. Dále bylo zjištěno, že pro měření směrové distribuce mozaikových bloků jsou nejvhodnější vzorky ze směru TL (tedy příčném na směr tváření). Na základě rozboru signálu AE se podařilo identifikovat změny v průběhu stádia kumulace poškození, které mohou korelovat právě s vytvářením a rozpadem dislokačních substruktur v případě rentgenografického pozorování.

Hlavní přínos práce spočívá v přístupu a zvolené metodice hodnocení cyklického poškozování materiálů. Jedná se zejména o možnost verifikovat naměřená data s ostatními nedestruktivními technikami. Kombinace využitých metod se stala silným nástrojem pro identifikaci a monitorování celého procesu únavové degradace materiálu.

6 ZÁVĚR

Dizertační práce se zabývá využitím metod NDT (akustická emise, elektronová mikroskopie, rentgenová difrakční topografie) k popisu a identifikaci stádií únavového procesu hliníkových slitin. Úvodní část je zaměřena na rešeršní studii, zabývající se převážně vlivem geometrie zkušebních těles a směrovosti struktury tvářených hliníkových slitin na únavovou životnost a aplikací metody AE a RTG difrakční topografie při zkouškách mechanických vlastností. Experimentální část na celou problematiku navazuje a rozšiřuje ji o nové přístupy a poznatky.

V případě výzkumu hodnocení únavových vlastností Al slitin ve vysokocyklové oblasti lze získané poznatky shrnout do následujících bodů:

- směrová heterogenita tvářené Al slitiny 6082/T6 nemá při ohybovém zatěžování zásadní vliv na únavovou životnost (obdobně se chová také slitina 7075/T6, která při vyšších životnostech vykazuje mírně zvýšenou odolnost ve směru LT – směru protlačování)
- smluvní mez únavy slitiny 6082/T6 se pohybuje při 10^7 cyklech kolem hodnoty 130 MPa, u slitiny 7075/T6 kolem 190 MPa.
- změnou geometrie příčného průřezu zkušebních těles Al slitiny 6082/T6 nedošlo při cyklickém ohybovém zatěžování k významným rozdílům v únavových životnostech
- v případě cyklického zatěžování sledovaných Al slitin dochází při střídavém ohybu k mírnému posunu experimentálních bodů směrem k vyšším životnostem oproti zatěžování osovým tahem-tlakem

Výsledky z měření signálu AE, RTG difrakce a rastrovací elektronové mikroskopie přinášejí několik důležitých poznatků:

- signál AE upozorňoval ve všech případech na počátek šíření magistralní trhliny dříve, než bylo zřejmé z průběhu (tuhosti) rezonanční frekvence vzorku zatěžovacího zařízení RUMUL
- mezi nejvhodnější parametry AE, pomocí kterých lze identifikovat nepatrné změny ve struktuře, patří: RMS, průběh maximálních amplitud a energie hitů událostí AE
- díky mikroskopickému výzkumu povrchového reliéfu bylo zjištěno, že vznik a začátek šíření magistralní trhliny probíhá už daleko dříve než v uvažovaném momentu poklesu frekvence (tuhosti vzorku), na což také částečně upozorňoval signál AE zejména amplitudou a energií hitů AE
- hlavní poznatek z výzkumu povrchu cyklicky zatěžovaného materiálu rentgenografickým pozorováním jsou periodické strukturní změny, ke kterým dochází po úvodní „náběhové části“ až do lomu vzorku
- pro měření směrové distribuce mosaikových bloků jsou nejvhodnější vzorky ze směru TL (tedy příčném na směr tváření)

Na základě rozboru signálu AE se podařilo identifikovat změny v průběhu stádia kumulace poškození, které mohou korelovat s vytvářením a rozpadem dislokačních substruktur získaných z rentgenografických analýz. Tyto hypotézy by mohly v

případě pokračování tohoto výzkumu vést také k otázce možnosti predikce zbývající životnosti vzorku za daných zkušebních podmínek.

Z výše uvedených 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.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MICHNA, Š. et al. *Aluminium Materials and Technologies from A to Z*. Alcan Děčín Extrusions, s r. o., 2007. s. 613. ISBN 978-80-89244-18-8.
- [2] VĚCHET, S., BOKŮVKA, O., KOHOUT, J. *Únavové vlastnosti tvárné litiny*. Žilina: 1. vyd., Žilinská univerzita, 2001. s. 157. ISBN 80-710-0910-5.
- [3] FIALA, J., MENTL, V., ŠUTTA, P. *Struktura a vlastnosti materiálů*. Praha: Academia, nakladatelství Akademie věd ČR, 2003. s. 561. ISBN 80-200-1223-0.
- [4] POLÁK, J. *Moderní principy predikce únavové životnosti materiálů a konstrukčních ocelí*. Brno: ÚFM AV ČR, 2006. Životnost materiálů a konstrukcí 2006. s. 7-14. ISBN 80-239-6751-7.
- [5] ZHAI, T. Strength distribution of fatigue crack initiation sites in an Al-Li alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*. Vol. 37A, Issue 10, 2006, pp. 3139-3147.
- [6] AL-MARAHLEH, G. S., ABUSHGAI, K. Experimentally investigation effect of geometrical cross-section on fatigue strength of aluminum alloy (6063). *Reviews on advanced materials science*. Vol. 27, No.1, 2011, pp.90-98.
- [7] KOPEC, Bernadr. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. s. 571. ISBN 978-807-2045-914.
- [8] LEE, D. S., LEE, J. H., LEE, M. R. Fatigue crack detection in coldworked aluminum alloys using acoustic emission technique. *Advances in Nondestructive Evaluation, PT 1-3*. Vols. 270-273, Part 1-3, 2004, pp. 537-542.
- [9] HUANG, M., JIANG, L., LIAW, P. K., BROOKS, CH. R., SEELEY, R. Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials. *JOM*. Sv. 50, No.11, 1998.
- [10] BERAN, P. *Modifikace upínací části zkušebního zařízení RUMUL Cracktronic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství, 2008. s. 57. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [11] LIŠKUTÍN, P., MAZAL, P., VLAŠIC, F. Slitiny EN AW 6082 a 7075 - srovnání vlivu směrovosti tvářené struktury na únavové charakteristiky. *Transactions of the Universities of Košice*. Sv. 2009, č. 4, 2009, s. 175-183.
- [12] VLASIC, F., MAZAL, P., LISKUTIN, P. Effect of Geometrical Cross Section on Fatigue Properties of Aluminum Alloy EN AW-6082. *Zeszyty naukowe politechniki Opolskiej seria Mechanika*. Vol. 95, No. 332, 2009, pp. 197-202.
- [13] MAZAL, P., LISKUTIN, P., FIALA, J., VLASIC, F. Application of NDT Procedures for Identification of Fatigue Life Stages of AlMg Alloys. In *17th World Conference on NDT*. Shanghai: CHSNDT and ICNDT, 2008. pp. 16-23. Book of abstracts, CD edition of full papers.

7.1 VÝBĚR Z LITERATURY AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE

Články v časopise:

VLASIC, F., MAZAL, P., LISKUTIN, P. Application of Acoustic Emission Method during High Cycle Fatigue of Aluminium Alloy. *Transactions of the VSB - Technical university of Ostrava, Mechanical series*. Vol. 56, No. 2, 2010, pp. 187-196.

VLASIC, F., MAZAL, P., HORT, F. Comparison of Acoustic Emission Signal and X-Ray Diffraction at Initial Stages of Fatigue Damage. *Journal of Acoustic Emission*. 1 January 2010, Vol. 28, pp. 170-178.

LISKUTIN, P., MAZAL, P., VLASIC, F. Slitiny EN AW-6082 a 7075 - srovnání vlivu směrovosti tvářené struktury na únavové charakteristiky. *Transactions of the Universities of Kosice*. Sv. 2009, č. 4, 2009, s. 175-183. ISSN 1335-2334.

VLASIC, F., MAZAL, P., LISKUTIN, P. Effect of Geometrical Cross Section on Fatigue Properties of Aluminum Alloy EN AW-6082. *Zeszyty naukowe politechniki Opolskiej seria Mechanika*. Vol. 95, No. 332, 2009, pp. 197-202. ISSN 1429-6055.

MAZAL, P., LISKUTIN, P., VLASIC, F. Changes of Mechanical Characteristics of Extruded Aluminium Alloys EN AW-6082 and 7075. *Transaction of the VSB-Technical university of Ostrava, Mechanical series*. Vol. 2009, No. 3, 2009, pp. 133-140. ISSN 1210-0471.

VLASIC, F., MAZAL, P., LISKUTIN, P. Contribution to Evaluation of Influence of Structure Directionality on Fatigue Properties of AlMg Alloy EN AW-7075. *Zeszyty naukowe politechniki Opolskiej seria Mechanika*. Vol. 92, No. 327, 2008, pp. 225-225. ISSN 1429-6055.

MAZAL, P., LISKUTIN, P., FIALA, J., VLASIC, F. Application of NDT Procedures for Identification of Fatigue Life Stages of AlMg Alloys. *The e-Journal of Nondestructive Testing*. Vol. 2008, 2008, pp. 8. ISSN 1435-4934.

Články ve sbornících:

VLASIC, F., MAZAL, P., NOHAL, L., LISKUTIN, P. Acoustic Emission Method and X-Ray Diffraction as Instruments for Evaluation of Material Degradation. In *Metal 2011 - 20th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: Tanger. 2011, p. 123 - 124.

ISBN 978-80-87294-22-2. (CD-ROM, containing full texts of lectures, is part of the proceedings)

VLASIC, F., MAZAL, P., HORT, F. Comparison of Acoustic Emission Signal and X-ray Diffraction at Initial Stages of Fatigue Damage. In *29th European Conference on Acoustic Emission Testing 2010*. Vienna: TUV Austria, 2010. pp. 361-369. ISBN 978-3-200-01956-0.

MAZAL, P., VLASIC, F. Applications of selected NDT procedures for more detailed identification of crack initiation stage at fatigue tests of aluminium alloys. In *Fatigue design 2009 Senlis*. CETIM , 2009. pp. 68-75.

ISBN 978-2-85400-908-8.

MAZAL, P., VLASIC, F., HORT, F. Applications of Continuous Sampling of AE Signal for Detection of Fatigue Damage. In *Vth Workshop NDT in Progress*. CNDT, 2009. pp. 383-390. ISBN 978-80-214-3968-9.

MAZAL, P., HORT, F., VLASIC, F. Results of Utilization of Loading Frequency and Continuous Sampling of AE Signal for Detection of Fatigue Damage of AlMg Alloys. In *The 10th International Conference of The Slovenian Society for Non-Destructive Testing*. Ljubljana, Slovenija: SSNDT, 2009. pp. 385-392.

ISBN 978-961-90610-7-7.

MAZAL, P., LISKUTIN, P., FIALA, J., VLASIC, F. Application of NDT Procedures for Identification of Fatigue Life Stages of AlMg Alloys. In *17th World Conference on NDT*. Shanghai: CHSNDT and ICNDT, 2008. pp. 16-23. Book of abstracts, CD edition of full papers.

8 CURRICULUM VITAE

Osobní údaje

Jméno a příjmení	Ing. František Vlašic
Adresa	Ukrajinská 23, 625 00, Brno
Telefon	+420 777 279 235
E-mail	ff.vlasic@centrum.cz
Státní příslušnost	ČR
Rodinný stav	ženatý
Datum a místo narození	20. 3. 1982, Valtice

Školní vzdělání

Období (od – do)	2007 - 2011
Název instituce	VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
Forma	doktorské prezenční studium
Zaměření	Únava materiálů, nedestruktivní testování
Obor	Fyzikální a materiálové inženýrství
Získaný titul	

Období (od – do)	2002 - 2007
Název instituce	VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
Forma	magisterské prezenční studium
Zaměření	Počítačová podpora konstruování
Obor	Aplikovaná mechanika
Získaný titul	Ing.

Období (od – do)	1998 - 2002
Název instituce	Střední průmyslová škola E. Beneše, Břeclav
Zaměření	Strojírenství

Zkoušky

30. 11. 2009	Státní doktorská zkouška na FSI VUT v Brně
20. 6. 2007	Státní závěrečná zkouška na FSI VUT v Brně
29. 5. 2002	maturitní zkouška na SPŠ E. Beneše v Břeclavi

Pracovní zkušenosti

1/2009 – 6/2011	IVEP, a. s. - konstruktér
8/2007 - 11/2007	IMPACT INDUSTRY BRNO, a.s. - příprava a plánování výroby, konstruktér
6/2005 - 8/2005	J+P BASE s.r.o. - pomocný pracovník, asistent

Ostatní znalosti

anglický jazyk
německý jazyk
práce na PC

aktivně
pasivně
MS Office, Adobe Photoshop, CAD (AutoCAD,
Autodesk Inventor, Pro/Engineer, SolidWorks),
internet

Řešené projekty

2/2009 – 12/2009

FRVŠ 1616 **Online sledování kontaktního
poškození. IS 1390121**

2/2009 – 12/2009

Fond vědy FSI **Systém upínání snímačů akustické
emise během únavových zkoušek neželezných
slitin. BD 139 3006**

Abstrakt

Dizertační práce se zabývá využitím metod nedestructivního testování (akustická emise, elektronová mikroskopie, rentgenová difrakční topografie) k popisu a identifikaci stádií únavového procesu hliníkových slitin. Hlavní přínos této práce spočívá v přístupu a metodice hodnocení cyklického poškození materiálů. Jednalo se zejména o možnost verifikovat naměřená data s ostatními nedestructivními technikami.

Z experimentálních výsledků lze usuzovat, že obor nedestructivního testování materiálů může zásadním způsobem odkrýt proces únavového poškození a prohloubit dosavadní znalosti v této oblasti. Kombinace využitých metod se stala silným nástrojem pro identifikaci a monitorování celého procesu únavové degradace materiálu.

Klíčová slova: nedestructivní testování, akustická emise, hliníková slitina, únavový proces, elektronová mikroskopie, rentgenová difrakční topografie

Abstract

The thesis deals with the application of nondestructive testing methods (acoustic emission, electron microscopy, X-ray diffraction topography) to description and identification of stages in the fatigue process in aluminium alloys. The main contribution of this dissertation thesis consists of the approach and evaluation methodology of cyclic damage in the materials. It dealt especially with the verification of measured data by using data obtained using other nondestructive methods.

The experimental results show that the field of nondestructive testing materials can fundamentally uncover the process of fatigue damage and improve current knowledge in this area. Combination of used methods has become a powerful tool for the identification and monitoring of the whole fatigue degradation process of materials.

Key words: nondestructive testing, acoustic emission, aluminium alloy, fatigue process, electron microscopy, X-ray diffraction topography