Vysoké učení technické v Brně
Brno University of Technology

Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor metodika konstruování

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of design methodology

Hodnocení mechanických vlastností slitin na bázi Al Mg s využitím metody AE

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]
[Discourse on the Dissertation Thesis]

Autor práce: **Ing. František Vlašic**
Author

Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.**
Supervisor

Brno 2009

ústav konstruování

OBSAH

1 ÚVOD **4**
2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE **5**
3 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ **9**
3.1 Únavové chování neželezných slitin 9
3.2 Aplikace metody akustické emise při výzkumu únavových vlastností neželezných slitin 42
4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE **57**
5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ **59**
6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE **60**
7 ZÁVĚR **64**
8 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK **65**
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ **68**

1 ÚVOD

Práce se zabývá hodnocením mechanických únavových vlastností neželezných slitin, při kterém využíváme k odhalení příčin vzniku a rozvoje únavového poškození jednu z defektoskopických metod – akustickou emisi (AE).

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, které se projevují jako mikroplastické deformace a po určitém počtu zátěžných cyklů dojde k porušení materiálu při napětím menším než mez kluzu či mez pevnosti. 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.

Na Ústavu konstruování se v rámci výzkumné skupiny „únavové vlastnosti“ již řadu let zabýváme zkoumáním únavových vlastností železných i neželezných slitin, zvláště pak slitin hliníku a hořčíku. Důvodem jsou velmi dobré mechanické vlastnosti a příznivá odolnost vlivům prostředí. Používají se v mnoha technických aplikacích, zejména v letectví a kosmonautice, dále automobilovém, strojírenském a elektrotechnickém průmyslu, ale i ve stavebnictví. Pro zpřesnění současných znalostí o vzniku a rozvoji únavového poškození využíváme metodu AE, která nám pomáhá spolu s rezonanční frekvencí zatěžování odhalovat změny chování materiálu při vysokocyklové únavě.

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Samotnou únavou materiálu a únavovým poškozováním se začali vědci zabývat v pol. 19. stol., kdy došlo k výraznému rozvoji strojírenství a dopravních prostředků a v souvislosti s tím také k prvním haváriím vozidel, nosníků mostů, hřídelí, ložisek, a dalších. Nejvýznamnější poznatky z této oblasti patří německému železničnímu inženýrovi Augustinu Wöhlerovi, který položil základ strategie, umožňující vyloučit havárie způsobené únavou. Touto strategií se staly únavové zkoušky různorodých materiálů při ohybovém, torzním i osovém zatěžování. I když od této doby uplynulo více jak 150 let, základní princip zkoušení zůstal stejný, jen přibyly další mechanismy vyvolávání zatížení (elektromagnetické, piezoelektrické, hydraulické) a průběh zkoušky i její vyhodnocení je řízeno počítačem.

V současné době existují dva hlavní přístupy pro rozbor namáhání a návrh bezpečné konstrukce z hlediska únavového porušení.

Tradiční přístup nebo také napěťový (od roku 1955 do dneška), je založen na rozboru nominálních (středních) napětí v součásti. Nominální napětí, jež vyjadřuje odolnost součásti vůči cyklickému zatěžování, je převážně určeno amplitudou napětí a středním napětím.

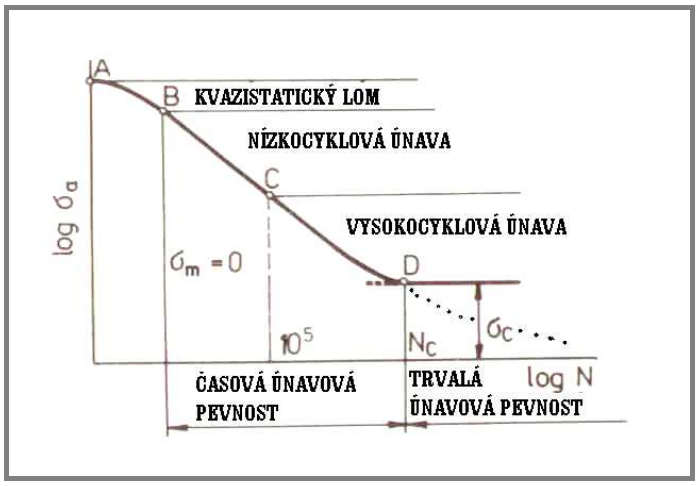
Deformační přístup zahrnuje mnohem podrobnější analýzu porušení součástí s vruby.

Oba přístupy vedou ke zjišťování materiálové charakteristiky – *křivky únavového života*. Tyto křivky se pak v praxi využívají k predikci únavového porušení, tedy k tomu, aby během provozu konstrukce nebyl naplněn únavový život (filozofie bezpečného života, angl. save live). Z historického hlediska mladší konstruktérskou filozofií je filozofie bezpečného lomu, angl. failure save. Tato filozofie je založena na lomové mechanice.

Jestliže budeme zatěžovat zkušební vzorek cyklickým napětím (amplitudou), odpovídajícím mezi pevnosti, dojde po několika málo cyklech k lomu, který nebude mít charakter únavového lomu, ale lomu kvazistatického. V případě, že stejný vzorek zatížíme amplitudou, která bude stejná nebo vyšší než mez kluzu vzorku, dostaneme se do oblasti nízkocyklové únavy (cca do 10^4 cyklů), která souvisí s lokální plastickou deformací. No a konečně v případě, že vzorek zatížíme napětím pod mezí kluzu, dostaneme se do oblasti vysokocyklové únavy (od cca 10^5 cyklů), ve které již není plastická deformace dominující pro chování materiálu a při jisté úrovni napětí již nedochází k únavovému poškozování. Tato limitní amplituda napětí se nazývá *mez únavy*. Když vyneseme do grafu hodnoty amplitudy napětí v závislosti na počtu cyklů do lomu, dostáváme křivku napětí - únavový život, také nazývánu jako S-N křivku (obr. 1).

Stěžejní oblastí této práce bude právě vysokocyklová únava, sahající až do 10^8 zátěžných cyklů. Je nutno podotknout, že na získané hodnoty při měření únavové pevnosti nebo meze únavy má vliv mnoho faktorů, mj. také výběr zkušebního materiálu. Hlavní pozornost disertační práce je upřena na hliníkové a hořčíkové slitiny, které vykazují odlišné únavové vlastnosti oproti např. konstrukčním ocelím. Křivka únavové životnosti σ_a - N_f 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

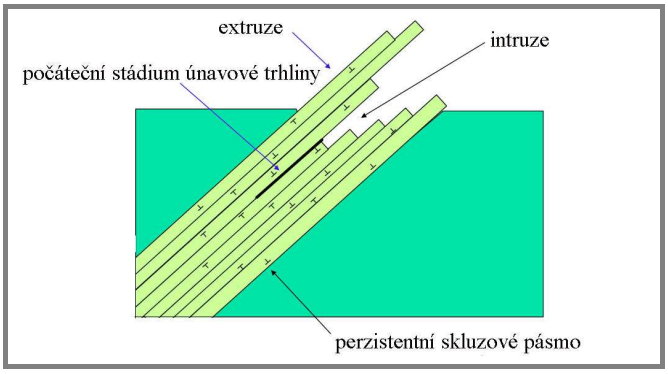
napětím stále klesá. Proto se hliníkové slitiny charakterizují časovou mezí únavy pro určitý počet cyklů (dle normy je to 10^8 cyklů pro hliníkové slitiny).



Obr. 1 Křivka únavového života (S-N křivka)

Únava je způsobena strukturní nehomogenitou, která je cyklickým namáháním vyvolána. Cyklické zatěžování totiž nutí dislokace se v krystalech rychle pohybovat a tím vytváří předpoklady pro jejich intenzivní interakci. Důsledkem zmíněných nehomogenit mikrostruktury je i nehomogenní rozdělení napětí v rámci struktury. Oblasti, kde vlivem těchto nehomogenit dochází ke zvýšení napětí, jsou místy nukleace únavového porušení [1].

Na základě těchto poznatků můžeme usoudit, že příčinou únavy materiálu je fakt, že se jeho plastická deformace neděje v celém objemu rovnoměrně. Plastickou deformací cyklicky zatěžovaného tělesa vzniknou zárodečné trhliny, jejichž růstem a sdružováním dojde nakonec k lomu. Zárodečné trhliny vznikají většinou na povrchu v místech intruzí skluzových pásů (obr. 2). To jsou duplexní lamelární útvary složené z desek poddajného materiálu (o nízké hustotě dislokací) proložených deskami materiálu tuhého (kde je hustota dislokací vysoká), jež se vůči sobě při plastické deformaci pohybují skluzem.



Obr. 2 Stádium iniciace únavových trhlin

U materiálů, které mají omezenou houževnatost, jako jsou např. vysokopevnostní kovy, je mikrostrukturní poškození méně rozšířené a má snahu se koncentrovat do okolí defektů. Malé trhliny se iniciují v okolí dutinek, inkluzí, skluzových pásů,

hranic zrn nebo defektů podobných trhlinám. Vzniklé trhliny rostou ve směru kolmém na hlavní napětí. Proto má mikrogeometrie a vůbec stav povrchu na únavu velký vliv.

Jak jsme mohli poznat, během cyklického zatěžování dochází v materiálu ke spoustě strukturních změn, které můžeme vizuálně v daný moment jen těžko zachytit nebo zaznamenat. Z tohoto důvodu jsme využili jednu z nedestruktivních metod zkoušení – akustickou emisi, která má tu schopnost dané změny zaznamenat.

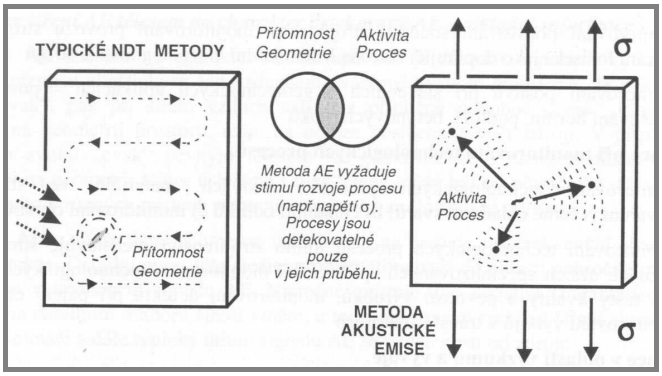
Akustickou emisí (AE) nazýváme akustické (elastické) vlny, generované dynamickým uvolněním mechanického napětí uvnitř materiálu tělesa. Metodou AE nazýváme metodiku detekce akustické emise na povrchu tělesa, jímž se emitované vlny šíří, následně metodiku elektronického zpracování a vyhodnocení parametrů detekované AE.

První systematické práce v této oblasti jsou spojeny se jménem německého fyzika Josepha Kaisera (polovina 20. stol.), který zkoumal akustické vlnění v kovech a poté objevil jev nebo efekt, nesoucí jeho jméno. Asi o deset let později se tato metoda začíná uplatňovat v praxi pro monitorování a detekci celé řady dalších procesů, které iniciují vznik AE šířící se tělesem. Mimo plastické deformace kovů se jedná o monitorování a identifikaci porušování materiálů konstrukcí, netěsností a úniků medií pod tlakem, tření, obrábění, svařování a dalších procesů [1].

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

- pasivní monitorování probíhajícího procesu - nevnáší 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

Je důležité si uvědomit, že díky detekci a monitorování rozvoje plastické deformace, aktivity defektů, iniciace a rozvoje porušení materiálu můžeme řadit metodu AE mezi nedestruktivní (NDT) metody zkoušení konstrukcí. Metoda AE a typické NDT metody se z podstaty svého principu poskytovanými informacemi a režimem nasazení nepřekrývají, ale doplňují (obr. 3).



Obr. 3 Principy metody AE a typických NDT metod [1]

Typické NDT metody charakterizují stav porušení, pracují s cílem vhodného „zviditelnění“ přítomnosti defektu v materiálu konstrukce. Přítomnost defektu se

projeví změnou intenzity záření, v šíření a odrazech UZ vln, změnou toku vířivých proudů, resp. magnetického toku, zviditelnění defektu penetrační kapalinou.

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.). Metoda AE detekuje, lokalizuje a hodnotí aktivitu defektů a rozvoj procesů právě a pouze v jejich průběhu a vzhledem ke skutečným podmínkám a režimu zkoušky, či provozu.

Kromě početných předností oproti ostatním NDT metodám má i metoda AE jisté omezení, kterými jsou:

- nedetekuje statické, neaktivní defekty a defekty, jejichž aktivita je „tichá“
- je nutné aplikovat stimul iniciace aktivity AE, obvykle zatížení konstrukce
- zkouška AE není opakovatelná (aktivita defektů je jev nevratný)

Na základě výše uvedených informací, zahrnujících problematiku únavového porušování materiálů, zaměřenou na hliníkové a hořčíkové slitiny a aplikaci metody AE, využité k podrobnějšímu hodnocení a monitorování strukturních změn během únavových zkoušek, jsme vymezili předběžné cíle disertační práce. Ty se budou týkat hodnocením únavových vlastností tvářených hliníkových slitin EN-AW-7075 a EN-AW-6082, zaměřeným především na jejich zřetelnou směrovou anizotropii struktury, která vzniká během výroby lisovaného profilu. Dalším zkoumaným materiálem bude hořčíková slitina AZ91, která díky obtížnému tváření byla odlita technologií squeeze casting (lití s dolisováním – slitina tuhne pod tlakem).

První etapa bude tedy zaměřena na získání základních souborů dat ze zkoušek cyklických vlastností Al a Mg slitin pomocí elektrorezonančního zatěžovacího pulzátoru RUMUL Cracktronic, který pracuje za podmínek čtyřbodového ohybu.

Ve druhé etapě proběhne analýza dat a srovnání s dalšími pozorováními materiálu (optická pozorování, RTG, apod.), zaměřená především na aplikaci metody AE, která výběrem vhodných parametrů dokáže in-situ blíže odhalit procesy, odehrávající se během únavového zatěžování a pomůže nám tak více objasnit chování materiálu při cyklických zkouškách. Následně identifikované změny parametrů signálu AE budou korelovány s reálnými změnami v zatěžovaných materiálech, zjištěnými výše uvedenými metodami.

3 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Současný stav poznání je zde objasněn na základě studia odborné literatury v oblasti nedestruktivního testování neželezných slitin, zaměřeného na únavové chování materiálů.

3.1 Únavové chování neželezných slitin

Počet mechanických zatěžujících cyklů, které musí konstrukční součást v provozu bezpečně zvládnout, je závislá na požadavcích, které jsou na ní kladené. V některých případech stačí, aby zařízení, resp. součást byla v průběhu životnosti schopná odolat jen velmi malému počtu cyklů. Naopak mnohé součásti a konstrukční uzly, např. části motoru, ložiska, turbíny, mosty atd., bývají v provozu většinou vystavené velmi vysokému počtu zatěžujících cyklů s relativně nepatrnými amplitudami zatěžování a téměř neměřitelnými amplitudami plastické deformace, kde základním požadavkem pro tyto součásti je, aby vydržely bez poškození mechanickým zatěžováním $N_f = 10^8 \div 10^{10}$ cyklů [2].

Únavové životy hliníkových slitin závisí 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). Pro konkrétní případy je proto nutné většinou provádět vlastní únavové zkoušky, které jsou nejen časově, ale i finančně náročné.

V posledních letech dochází k rozvoji studia velmi dlouhé únavové životnosti materiálů (mezi 10^7 a 10^{10} cyklů), zvláště u vysokopevnostních ocelí. Je dobře známo, že Al slitiny nevykazují tradiční mez únavy v S-N diagramu mezi 10^6 a 10^7 cyklů. Únavové poškození může nastat i po 10^7 cyklů. Nicméně doposud byly provedeny pouze omezené studie velmi dlouhé únavové životnosti a růstu únavové trhliny hliníkových slitin kvůli časové omezenosti.

Na následujících stranách budou prezentovány práce, zabývající se únavovým hodnocením Al slitin v oblasti vysokocyklové únavy, zaměřené především na vliv směrovosti struktury na únavové vlastnosti.

SRIVATSAN, T. S., ANAND, S., SRIRAM, S., VASUDEVAN, V. K. The high-cycle fatigue and fracture behavior of aluminum alloy 7055. *In: Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*. Vol. 281, No. 1-2, pp. 292-304, 2000. ISSN: 0921-5093.

Článek uvádí výsledky studia vysokocyklové únavy, deformace a lomového chování Al slitiny EN-AW-7055/T7751 s nehomogenní strukturou, která byla cyklicky zatěžována při zvýšené teplotě a teplotě okolí. Experimentální body, získané z únavových zkoušek, ležely v obou směrech při okolní teplotě přibližně ve stejném rozptylovém pásu. Za zvýšených teplot byla při nízké amplitudě napětí vyšší únavová odolnost vzorků vyrobených v příčném směru oproti vzorkům v podélném směru. Makroskopický lomový mód byl v zásadě identický bez ohledu na orientaci zkušebních vzorků. Mikroskopické snímky únavových lomů odhalily lokálně tvárné a křehké mechanismy.

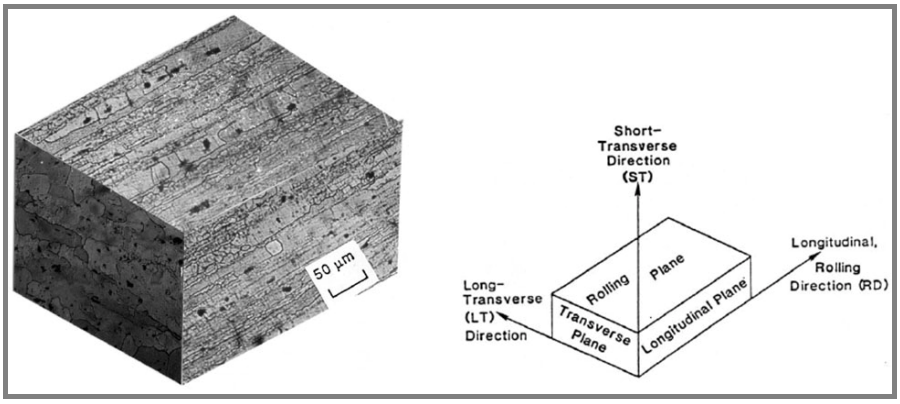
Experiment

Společnost ALCOA (Aluminum Company of America) poskytla k následujícím experimentům hliníkový plech (EN-AW-7055) o tloušťce 26 mm ve stavu T7751, což obnáší tepelné zpracování, které se skládá z ohřevu na žíhací teplotu (rozpouštěcí žíhání), ochlazení do vody, umělého přestárnutí při teplotě 190 °C a řízené trvalé deformace. Chemické složení je zobrazeno v tab. 1.

Tab. 1 Chemické složení Al slitiny EN-AW-7055/T7751

	Cu	Mg	Zn	Zr	Mn	Cr	Al
EN-AW-7055	2,41	2,00	8,20	0,11	0,005	0,003	zbytek

Z tohoto plechu byly zhotoveny válcové zkušební vzorky v podélném a příčném směru (vůči směru tváření), viz obr. 4. Měrná část má parametry: délka 25 mm, průměr 6,25 mm. K minimalizaci povrchových nerovností byla měrná část vzorku broušena a nakonec leštěna hliníkovou pastou k odstranění škrábanců a stop po obráběcím nástroji.



Obr. 4 Trojrozměrný snímek struktury Al slitiny EN-AW-7055/T7751

Zkoušky vysokocyklové únavy byly vykonány na plně automatickém servohydraulickém zkušebním zařízení *INSTRON 8500 Plus* při teplotě okolí (27 °C)

a zvýšené teplotě (190 °C) za konstantní frekvence 5 Hz a napěťovém poměru $R = 0,1$.

Detailní studium mikrostruktury bylo provedeno pomocí transmisního elektronového mikroskopu (TEM) Phillips CM 20, lomové plochy pak užitím skenovacího elektronového mikroskopu (SEM).

Výsledky

Nestejnorodá velikost rekrystalizovaných zrn ze všech směrů tvářeného polotovaru má za následek anizotropní strukturu. TEM odhalil následující poznatky:

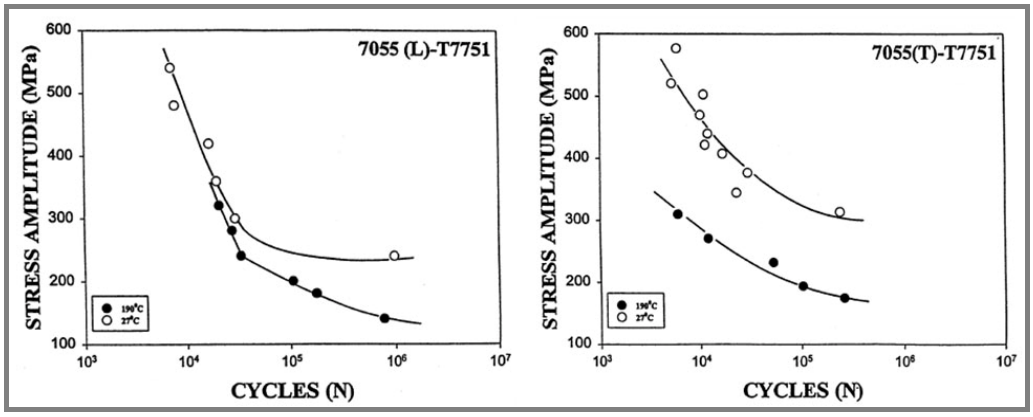
a) přesně stanovené hranice zrn nejednotné velikosti v rekrystalizované struktuře
b) rovnovážné η precipitáty lemující vysokoúhlové hranice zrn společně s úzkými bezprecipitačními zónami
c) náhodné rozložení kulových β´ precipitátů Al_3Zr uvnitř zrn o průměru cca 25 nm

Jednoosé mechanické charakteristiky Al slitiny 7055/T7751 v obou směrech při teplotě okolí a zvýšené teplotě jsou zobrazeny v tab. 2. Se zvyšující se teplotou klesá u obou směrů mez kluzu i mez pevnosti v tahu.

Tab. 2 Mechanické charakteristiky Al slitiny EN-AW-7055/T7751

Orientace	Teplota [°C]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
Podélný	27	610	630	12	16
	190	395	400	23	40
Příčný	27	620	650	10	16
	190	395	395	20	49

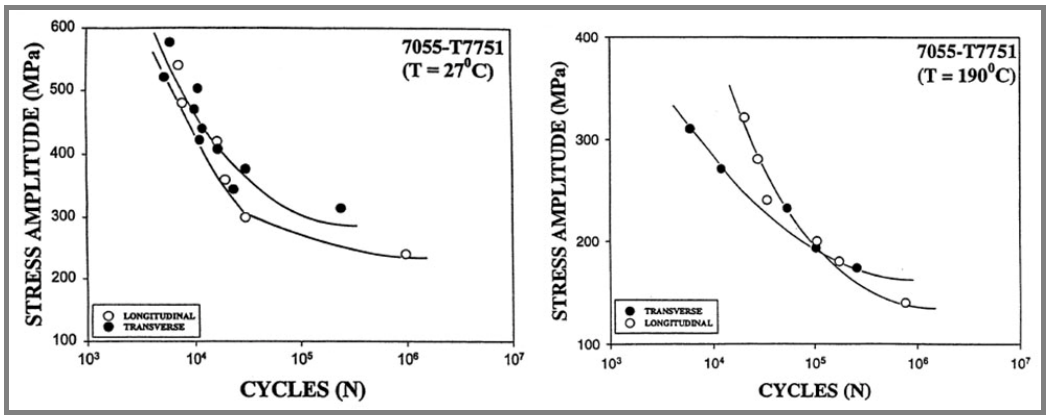
Výsledky cyklických zkoušek (osový tah-tlak) řízené amplitudy napětí jsou zobrazeny na obr. 5 a 6. Zvýšení zkušební teploty z 27 °C na 190 °C způsobilo pro oba směry degradaci únavové pevnosti s průvodní degradací cyklického únavového života. Při ekvivalentních hodnotách amplitudy napětí byla degradace únavového života při zvýšené teplotě v podélném směru marginální, zatímco v příčném byla znatelná (obr. 5).



Obr. 5 Vliv teploty na únavovou životnost Al slitiny EN-AW-7055/T7751 v podélném (vlevo) a příčném směru (vpravo)

Při pokojové teplotě (27 °C) ležely experimentální body z obou směrů přibližně ve stejném rozptylovém pásu. Avšak při 190 °C a vyšších amplitudách napětí vykazovaly vzorky v podélném směru zvýšenou únavovou odolnost oproti vzorkům

v příčném směru, zatímco při nižších amplitudách a výsledně vyšší životnosti odhalily vzorky v obou směrech přibližně identickou odolnost proti únavě (obr. 6).



Obr. 6 Amplituda napětí v závislosti na počtu cyklů do lomu Al slitiny EN-AW-7055/T7751 při pokojové teplotě (27 °C, vlevo) a zvýšené teplotě (190 °C, vpravo)

Lomové plochy, vzniklé za pokojové teploty při maximálním napětí 520 MPa (N_f = 5349 cyklů), odhalily charakteristické oblasti stabilního růstu trhliny a přetížení. Celkový pohled na lomovou plochu odkryl křehký mód porušení. Oblast iniciace trhliny a pomalého, stabilního růstu trhliny byla relativně plynulá v porovnání s oblastí přetížení. Vzorky deformované při nižším napětí - 410 MPa (N_f = 16 978 cyklů) odhalily evidentní oblast stabilního růstu trhliny. Při větším zvětšení byla zjištěna relativně hladká morfologie lomové plochy s rysy podobnými striacím.

Při zvýšené teplotě 190 °C a vyšší amplitudě napětí (σ_{max} = 320 MPa, N_f = 20 774 cyklů) se na lomových plochách odhalila oblast pomalého a stabilního růstu trhliny, zahrnující množství dutin proměnné velikosti a tvarů. Četné trhlinky částic sekundární fáze byly rozloženy náhodně po celé lomové ploše. Avšak při nižší amplitudě napětí (σ_{max} = 181 MPa, N_f = 173 360 cyklů) byla lomová plocha v zásadě bimodální, tzn., že obsahovala jak transkrystalické, tak i interkrystalické oblasti. Transkrystalická plocha byla téměř jednotvárná. Oblast stabilního růstu trhliny také odhalila místa, připomínající lokálně tvárné porušení (dutiny a důlky proměnné velikosti a tvaru) a křehké porušení, obsahující makroskopické trhliny šířící se paralelně k hlavnímu napětí.

Závěr

Veškeré výsledky ze zkoušek, uskutečněné na Al slitině EN-AW-7055/T7751 můžeme shrnout v následujících bodech:

1. Slitina má částečně rekrystalizovanou strukturu s velkými rekrystalizovanými zrny, protaženými v podélném směru. Hrubé částice sekundární fáze a částečně rozpuštěná základní fáze jsou izolované a náhodně rozložené ve třech vzájemně kolmých směrech.

2. V matrici byly nalezeny náhodně rozptýlené kulové precipitáty Al_3Zr a poblíž vysokoúhlových hranic zrn, zřídka v subzrnu nebo nízkoúhlových hranic zrn byly také zpozorovány úzké bezprecipitační zóny.

3. Mez kluzu a mez pevnosti v tahu byla po tepelném zpracování T7751 téměř identická jak v podélném, tak i v příčném směru. Se zvýšením teploty došlo ke snížení pevnosti slitiny přibližně o ⅓. Morfologie tahové trhliny byla při dané

zkušební teplotě identická pro oba směry. Makroskopický lom slitiny byl hodnocen jako střihový, zatímco mikroskopické snímky odhalily rysy, připomínající křehké a lokálně tvárné mechanismy, tj. kombinace trhlin jdoucí napříč a podél hranic zrn, spojených tvorbou, růstem a spojováním tvárných mikrodutin.

4. Během cyklického zatěžování při okolní teplotě prostředí ležely experimentální body z obou směrů přibližně ve stejném rozptylovém pásu. Při zvýšené teplotě a nízké amplitudě napětí naznačovaly vzorky, vyrobené v příčném směru, vyšší únavovou odolnost oproti vzorkům v podélném směru. Nicméně při vysoké amplitudě napětí a tím pádem krátké únavové životnosti odhalily vzorky v příčném směru významně nižší únavovou odolnost ve srovnání se vzorky ve směru podélném.

Vlastní (z)hodnocení a přínos

Autoři se v tomto článku zabývali detailním studiem vysokocyklové únavy tvářené Al slitiny 7055/T7751 s nehomogenní strukturou při teplotě okolí a zvýšené teplotě. Také neméně obsáhlou část článku věnovali detailnímu rozboru změn v mikrostruktuře během cyklického namáhání. V případě statických zkoušek došli k závěru, že směrovost struktury nemá výrazný vliv na mez pevnosti a mez kluzu. Jak se také očekávalo, se zvýšením teploty docházelo k poklesu meze pevnosti a meze kluzu. Co se týče cyklických zkoušek, zde byly výsledky už celkem zajímavé, protože vliv směrovosti na únavovou životnost hlavně při zvýšené teplotě byl zásadní. Jak je zřejmé z obr. 5, zvýšená teplota v podélném směru způsobila nepatrnou degradaci únavové pevnosti hlavně při nižších amplitudách napětí. Ve směru příčném vedl vliv teploty k viditelně markantnímu poklesu únavové pevnosti jak při nižších tak i vyšších amplitudách napětí. Když ale srovnáme experimentální výsledky při pokojové teplotě z obou směrů (obr. 6 vlevo), nezjistíme významný výkyv. Při zvýšené teplotě ale dostáváme velmi zajímavé výsledky z obou směrů. Zatímco při nižších amplitudách nedochází k výraznému vychýlení, při vyšších vykazují vzorky v podélném směru značně zvýšenou únavovou odolnost vůči vzorkům ve směru příčném.

Na základě výsledků vysokocyklové únavy Al slitiny 7055/T7751 lze obecně říci, že v případě použití této slitiny, která bude v praxi cyklicky zatěžována, nemusíme brát při normálních teplotách zřetel na její směrovost.

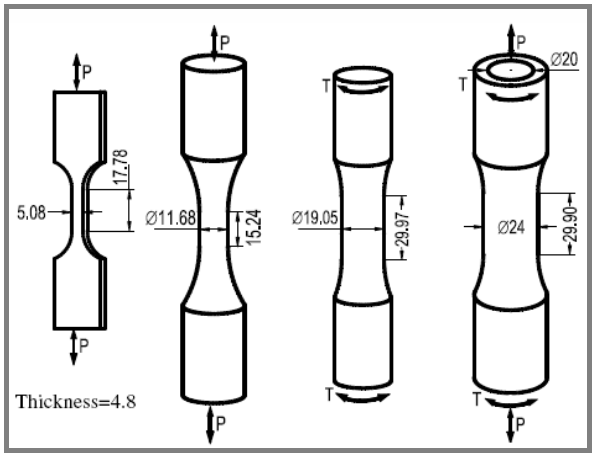
TIANWEN, Z., YANYAO, J. Fatigue of 7075-T651 aluminum alloy. *In: International Journal of Fatigue*. Vol. 30, No. 5, pp. 834-849, 2007.

Tento článek se zabývá rozsáhlými únavovými experimenty Al slitiny EN-AW-7075/T651 za jednoosého tahového, torzního a axiálně-torzního namáhání. V experimentech byly zkoumány různé polohy středního napětí, které měly podstatný vliv na únavovou pevnost materiálu. Střední napětí pulsující v tahové oblasti významně snížilo únavovou pevnost. Při axiálně-torzních zkouškách trubkových vzorků se studovalo víceosé únavové chování díky rozdílným zatěžovacím drahám. Bylo zjištěno, že chování únavové trhliny je závislé na zatěžovací dráze stejně jako na velikosti zatížení. Když byla velikost zatížení vysoká, materiál vykazoval smykové trhliny. Když bylo napětí pod jistou hladinou, materiál vykazoval tahové trhliny. Ve většině případů byla ale tvorba trhlin smíšená.

Experiment

Většina experimentálních studií, zaměřených na slitiny Al, se soustředila na vysokocyklovou únavu při jednoosém cyklickém zatížení tah-tlak s účinkem polohy středního napětí. Často užívaná zobrazení: amplituda napětí – počet cyklů do lomu (stress – life) a deformace – počet cyklů do lomu (strain – life) jsou založena na ustálených napěťově – deformačních hysterezních smyčkách.

Pro výzkum experimentů byly vyrobeny celkem čtyři typy vzorků (obr. 7) z Al slitiny EN-AW-7075-T651.

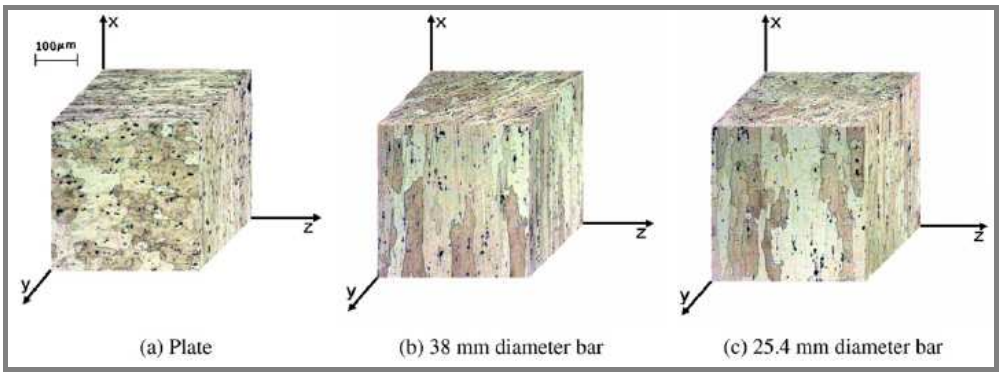


Obr. 7 Typy experimentálních vzorků a charakter zatěžování (rozměry v mm)

Obr. 8 zobrazuje mikrostrukturu tří druhů polotovarů, ze kterých se vyráběly jednotlivé vzorky. Každý stereoskopický snímek byl syntetizovaný ze tří mikrostruktur, získaných z jednotlivých směrů kolmých na směr tváření (x – směr tváření, y – kolmý směr, z – příčný směr).

U plochého vzorku v rovině ve směru tváření byla identifikována rovnoosá zrna. Velikost zrna se pohybovala od 10 µm do 100 µm. V rovinách kolmých na směr tváření a příčných byla zpozorována vláknitá zrna. Jedná se o typickou mikrostrukturu po tváření za studena. U válcových vzorků, vyrobených z tyče kruhového průřezu 25,4 mm, byla zjištěna rovnoosá zrna v rovině kolmé na osu. Rozsah velikosti zrna byl od 10 µm do 40 µm. V rovině rovnoběžné s osou byla opět

shledána vláknitá struktura. Průměrná délka zrn v podélném směru byla asi 70 µm. Jedná se tedy o typickou mikrostrukturu po lisování nebo protlačování za studena.

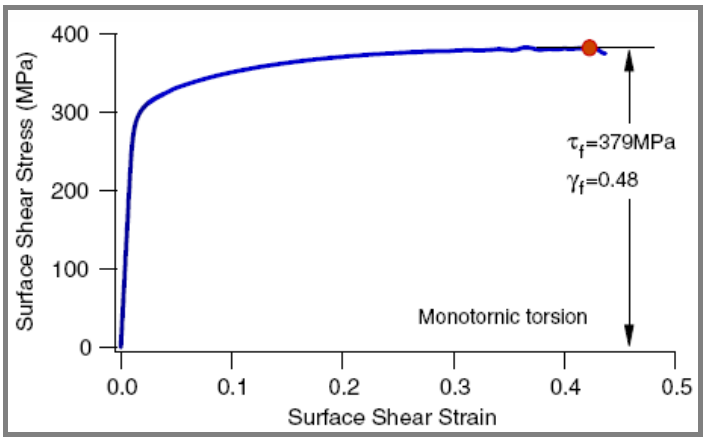


Obr. 8 Stereoskopické snímky mikrostruktury ze tří druhů polotovarů

Únavové experimenty na válcových, trubkových a plochých vzorcích byly provedeny na zkušebním servohydraulickém stroji INSTRON 8800 a 8870 (zatížení tah, tah-krut). Všechny zkoušky byly provedeny při atmosférických podmínkách.

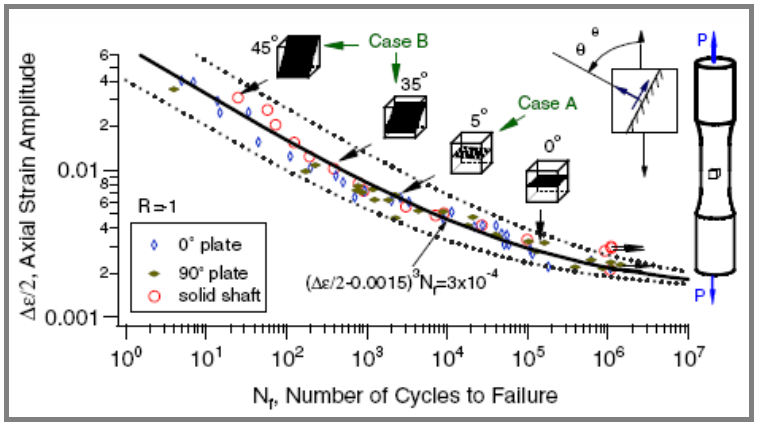
Výsledky

Obr. 9 zobrazuje průběh smykového napětí v závislosti na smykové deformaci, získaný při monotonním torzním zatěžování kulatého vzorku.

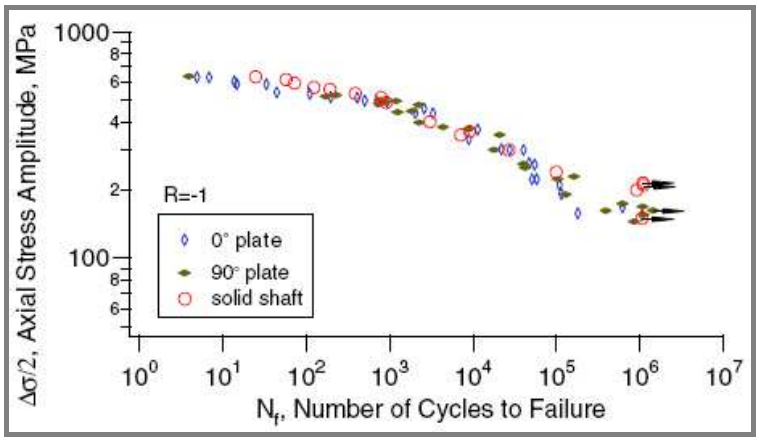


Obr. 9 Křivka smykového napětí v závislosti na smykové deformaci

Obr. 10 a 11 znázorňují základní data únavového chování plochých vzorků ve dvou směrových orientacích a válcového vzorku při reverzním jednoosém zatěžování. Tečkované čáry v obr. 10 znázorňují přibližný rozptyl experimentálních výsledků. Ze zkoušek vyplynulo, že při překročení 2 000 cyklů je rovina mikrotrhlin kolmá k vektoru vnějšího napětí. V případě únavové životnosti nižší než 100 cyklů svírá rovina mikrotrhlin úhel přibližně 45° s vektorem vnějšího napětí.

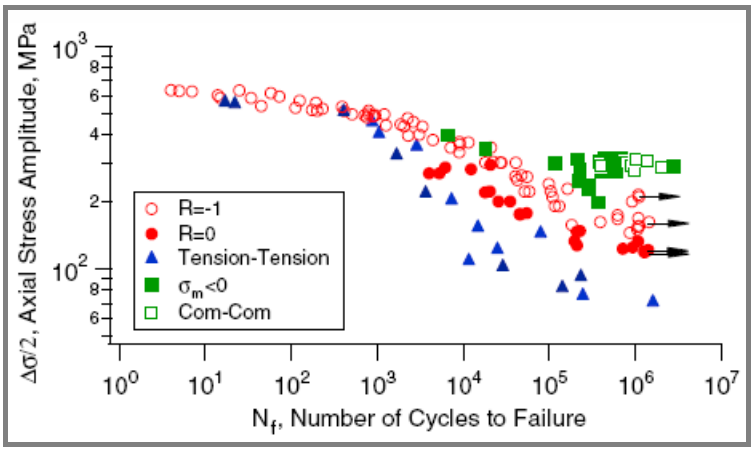


Obr. 10 Průběh amplitudy deformace na počtu cyklů do lomu při jednoosém zatěžování



Obr. 11 Průběh amplitudy napětí na počtu cyklů do lomu při jednoosém zatěžování

Jednoosé únavové zkoušky byly také provedeny při různých asymetriích zatěžování. Výsledky z těchto zkoušek jsou zobrazeny na obr. 12.



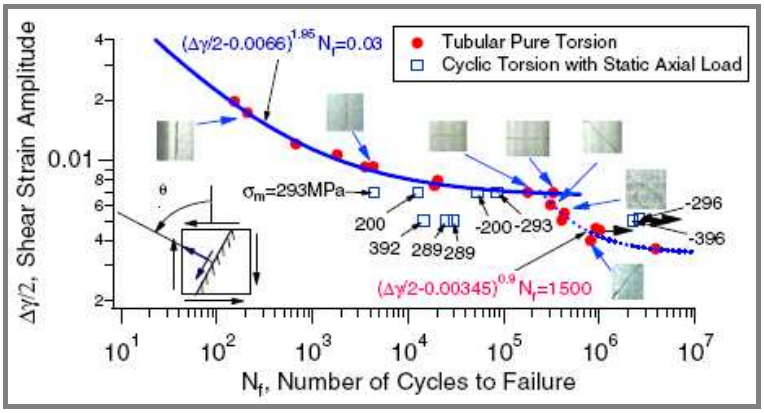
Obr. 12 Průběh amplitudy napětí na počtu cyklů do lomu při různé asymetrii jednoosého zatěžování

Zde je zřetelně vidět, že poloha středního napětí má významný vliv na únavovou životnost. Několik vzorků pulzovalo v tlakové oblasti s nulovým nebo záporným

maximálním napětím. Vzorky byly vystaveny tomuto typu zatížení až do 10^6 cyklů, za účelem zhodnotit únavovou degradaci. Poté následovalo zatěžování řízenou amplitudou napětí 100 MPa s R = 0, které by končilo únavovou životností delší než 10^7 cyklů.

Vzhledem k tomu, že se únavové mikrotrhliny vytvářely v rovinách kolmých na směr zatěžovacího napětí, bylo obtížné při tomto typu zatížení identifikovat porušení vzorku. Proto se zavedlo dvoustupňové zatěžování, aby se mohlo lépe rozpoznat únavové poškození v režimu zatěžování v tlakové oblasti. Jestliže byl ve druhém stupni zatěžování počet zátěžných cyklů významně dlouhý, mohlo to naznačovat, že únavová degradace z prvního stupně nevykazovala podmínky pro vznik únavového poškození. Naopak jestliže u vzorku ve druhém stupni došlo po několika zatěžovacích cyklech k lomu, bylo velmi pravděpodobné, že první stupeň musel generovat významné únavové poškození. Z naměřených výsledků je zřejmé, že počty cyklů ve druhém stupni dosahovaly velmi nízkých hodnot, řádově v jednotkách, maximálně v desítkách tisíc cyklů. Z toho vyplývá, že k únavovému poškození docházelo již během prvního stupně, tj. při zatěžování v tlakové oblasti.

Obr. 13 ukazuje výsledky únavových zkoušek při zatížení prostým smykem a smykem v kombinaci se statickým osovým napětím. V grafu zobrazují plné značky zatížení čistým krutem a prázdné značky právě kombinaci se statickým zatížením. Výsledky naznačují, že kladné statické zatížení významně snižuje únavovou životnost vzorku. Jestliže bylo aplikováno tlakové osové zatížení při amplitudě smykové deformace 0,69%, na únavovou životnost neměl tento typ statického zatížení vliv. V případě amplitudy smykové deformace 0,5% viditelně zvyšuje únavovou životnost oproti kladnému (tahovému) statickému zatížení.



Obr. 13 Průběh amplitudy smykové deformace v závislosti na únavové životnosti pro čistý krut a krut se statickým osovým napětím

Závěr

Únavové zkoušky Al slitiny 7075-T651 potvrdily, že k významnému únavovému poškozování může docházet i v případě zatěžování středním napětím pulzujícím v tlakové oblasti, které z obr. 12 zřetelně potvrzuje nejvyšší únavovou odolnost ze všech zkoumaných asymetrií zatěžování. Bylo tedy verifikováno, že střední napětí má významný vliv na únavovou životnost. Obvykle v materiálu převládá jeden typ tvorby trhlin. V Al slitině EN-AW-7075/T651 se naopak vytvářejí smykové, smíšené a tahové mikrotrhliny, závislé na velikosti zatížení. Charakteristickým znakem při cyklickém torzním zatěžování je výrazný ohyb, zobrazen v grafu smyková

deformace – únavová životnost (obr. 13), který je doprovázený změnou tvoření trhlin.

Vlastní (z)hodnocení a přínos

Tato práce přináší do oblasti únavového poškozování Al slitin celkem významný přínos, a to díky ojedinělému způsobu zatěžování, kterým je cyklický krut, kombinovaný se statickým osovým zatížením. Autoři mohli díky kvalitně vybavené laboratorní základně využít dvou zatěžovacích únavových strojů, pomocí kterých prováděli cyklické zkoušky v režimu tah-tlak u plochých a válcových vzorků, dále krut u válcových a krut se statickým osovým zatížením u trubkových vzorků. Z obr. 12 vyplývá, že střední napětí pulsující v tahové oblasti významně snížilo únavovou pevnost, zatímco v tlakové oblasti vykazovalo nejvyšší únavovou odolnost oproti všem režimům asymetrie zatěžování. Při axiálně-torzních zkouškách trubkových vzorků se studovalo víceosé únavové chování díky rozdílným zatěžovacím drahám. Bylo zjištěno, že chování únavové trhliny je závislé na zatěžovací dráze stejně jako na velikosti zatížení. Když byla velikost zatížení vysoká, materiál vykazoval smykové trhliny. Když bylo napětí pod jistou hladinou, materiál vykazoval tahové trhliny. Ve většině případů byla ale tvorba trhlin smíšená.

Co se týče směrovosti struktury u této slitiny, obr. 11 názorně ukazuje, že orientace vláken nemá zásadní vliv na únavovou degradaci a experimentální body leží ve stejném rozptylovém pásu.

WANG, Q. Y., KAWAGOISHI, N., CHEN, Q. Fatigue and fracture behaviour of structural Al-alloys up to very long life regimes. *In: International Journal of Fatigue.* Vol. 28, No. 11, pp. 1572-1576, 2006.

V tomto článku byla vyšetřována dlouhotrvající únavová životnost hliníkových slitin EN-AW-7075/T6, EN-AW-6061/T6 a růst únavové trhliny (v oblasti kolem prahové hodnoty faktoru intenzity napětí) využitím zrychlených zkoušek na piezoelektrickém stroji při 19,5 kHz. U těchto dvou Al slitin byly pozorovány významné povrchové dutiny (póry) během iniciace trhliny a počátečního růstu únavové trhliny. Únavové porušování Al slitin by mohlo být přisuzováno tvorbě únavových dutin, jejich růstu a spojování, a následnému vzniku a šíření makroskopických trhlin. Kromě toho bylo také zjištěno, že rychlost růstu malých únavových trhlin byla u těchto slitin vyšší, než u trhlin větších rozměrů při stejném rozsahu faktoru intenzity napětí.

Experiment

Hliníkové slitiny, jako EN-AW-2024/T3, EN-AW-7075/T6 a EN-AW-6061/T6, obsahují četné základní částice křehké fáze, rozptýlené v houževnaté matrici, které hrají důležitou roli ve tvorbě dutin. Jestliže jsou tyto materiály podrobeny statickému nebo cyklickému zatížení, může mít růst a šíření těchto mikrodutin vliv (dopad) na vznik únavového lomu.

Jako zkušební vzorky byly použity dvě hliníkové slitiny EN-AW-7075 a EN-AW-6061 ve stavu T6. Mechanické vlastnosti a chemické složení zkušebních materiálů je zobrazeno v tab. 3.

Tab. 3 Mechanické charakteristiky a chemické složení

Table 1
Mechanical properties

Material	E (GPa)	ρ (kg/m^3)	σ_T (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)
7075 (T6)	72	2800	764	691
6061 (T6)	69	2800	468	310

Table 2
Chemical compositions (mass%)

Material	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Cr	Zn
7075	0.10	1.47	0.25	0.03	2.56	0.20	5.46
6061	0.70	0.27	0.44	0.02	0.90	0.08	0.05

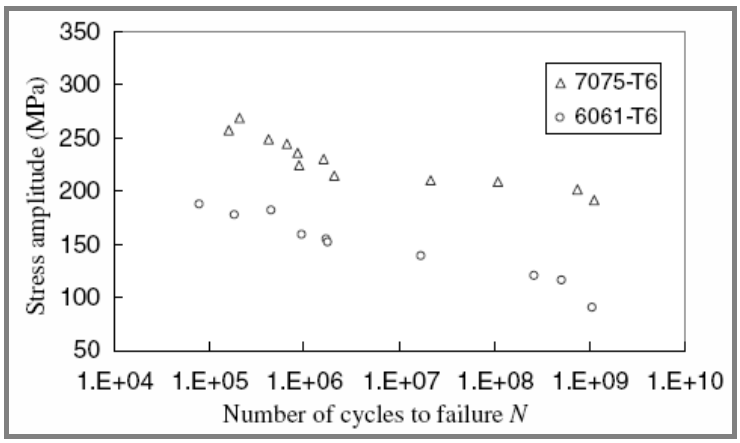
Z těchto slitin byly vyrobeny 2 typy vzorků s měrnou délkou 27,1 mm, měrným průměrem 4 mm a maximálním průměrem průřezu 12 mm se souvislým poloměrem 25 mm. Pro testování růstu únavové trhliny byl použit vzorek „dog-bone“ (vzorek ve tvaru psí kosti) s jedním „V“ vrubem, mající úhel 60° a délku 1 mm. Měrné plochy všech vzorků byly před vlastní zkouškou leštěny smirkovým papírem.

Únavové zkoušky byly provedeny na ultrazvukovém rezonančním systému, provozovaném při 19,5 kHz za nulového středního napětí (R = -1). Během zkoušky bylo střídavé napětí řízeno prostřednictvím bezkontaktního vláknového optického senzoru, schopného měřit s přesností na 0,05 μm. V tomto výzkumu byly provedeny celkem dvě série zkoušek. První série testů byla uskutečněna pod stálou kontrolou zatěžovací amplitudy k získání dat cyklické amplitudy napětí na počtu cyklů. Ve druhé sérii byly vykonány experimenty za proměnného cyklického napětí, zabývající

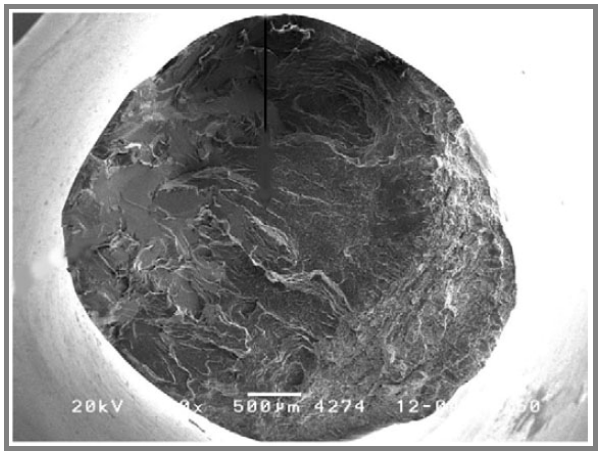
se chováním růstu malých a velkých únavových trhlin v oblasti kolem prahové hodnoty faktoru intenzity napětí. K obdržení dat o růstu únavové trhliny byly použity tři vzorky z každé slitiny. Růst trhliny a snímky povrchu zkoušených vzorků byly sledovány přenosným mikroskopem se zvětšením 200x. Tento postup vedl k tomu, že po určitém počtu cyklů se musela únavová zkouška přerušit a pořídit potřebné snímky. Minimální zjistitelná délka trhliny byla 0,05 mm.

Výsledky

Na obr. 14 jsou znázorněny S-N křivky Al slitin EN-AW-6061 a EN-AW-7075 ve stavu T6 v širokém rozsahu 10^4 až 10^9 cyklů. Z těchto experimentálních výsledků je zřejmé, že u obou slitin dochází k únavovému porušování i po překročení 10^7 cyklů. Odolnost proti únavovému porušení je u EN-AW-7075 viditelně vyšší než v případě druhé slitiny, a to ve stejné nadměrně dlouhé životní oblasti. Únavová pevnost slitiny EN-AW-7075 je při 10^7 cyklů 210 MPa, u EN-AW-6061 je to „jen“ 140 MPa. Fraktografické rozbory byly provedeny použitím SEM (rastrovacího elektronového mikroskopu). Místa iniciace trhliny byla nalezena většinou na povrchu materiálu, na rozdíl od vysokopevnostních ocelí, kde byl vznik trhliny v oblasti dlouhé životnosti dominantní pod povrchem.



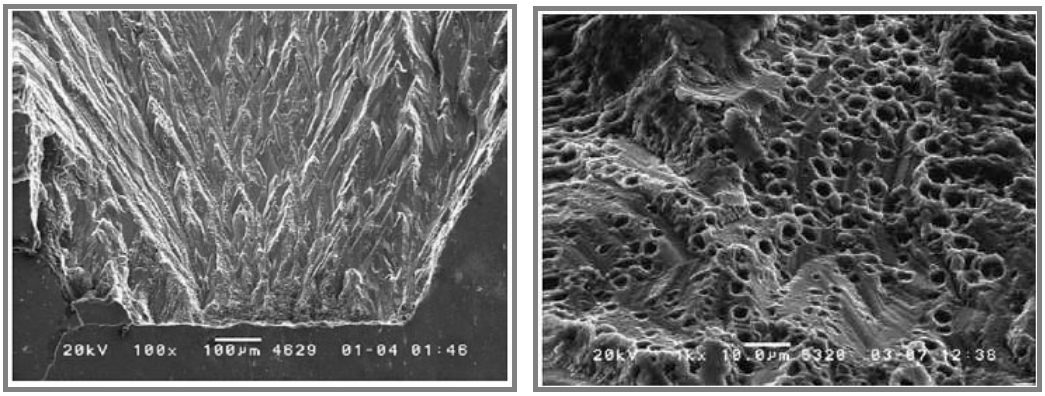
Obr. 14 S-N závislosti Al slitin EN-AW-7075 a EN-AW-6061



Obr. 15 Lomová plocha Al slitiny EN-AW-6061/T6

Lomové plochy testovaných vzorků byly také detekovány SEM. Obr. 15 znázorňuje typickou vysokocyklovou lomovou plochu slitiny EN-AW-6061 při $1{,}8.10^6$ cyklů. Únavový lom začíná tvořením, růstem a spojováním povrchových dutin a končí vznikem a šířením makrotrhlin.

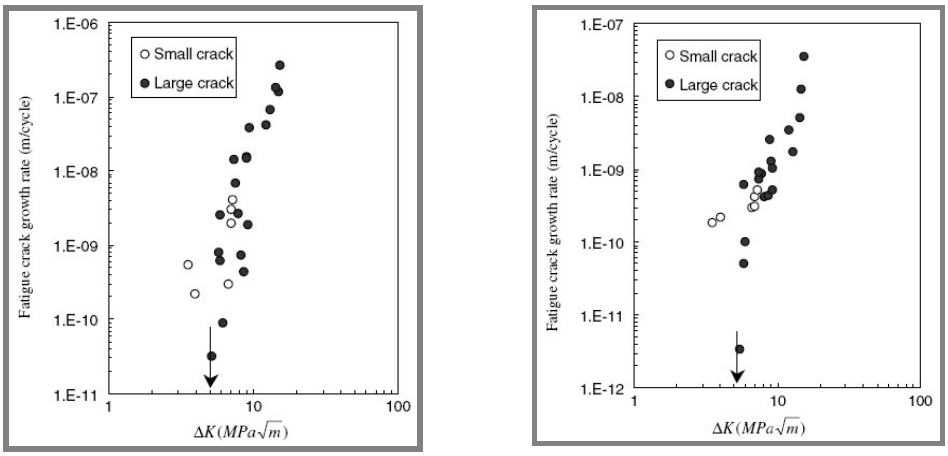
Na obr. 16a je znázorněna lomová plocha Al slitiny EN-AW-7075/T6 při $7{,}6.10^6$ cyklů, mající vzhled fasety, i když zde jsou menší než v případě druhé slitiny. Na dalším snímku (obr. 16b) můžeme zpozorovat významné mezifázové dutiny v procesu růstu únavové trhliny. Růst únavové trhliny měl zpočátku charakter transkrystalického lomu, poté kombinovaného trans-interkrystalického lomu.



a) b)

Obr. 16 Lomová plocha Al slitiny EN-AW-7075/T6 (a) a její mezifázové dutiny (b)

Prahová hodnota faktoru intenzity napětí ΔK_{th} je v tomto případě definována jako oblast faktoru intenzity napětí, ve které rychlost růstu trhliny je menší než 10^{-10} m/cyklus, tj. růstu 1 mm za 10^7 cyklů. Průběhy závislostí růstu malých a velkých trhlin Al slitin jsou zobrazeny na obr. 17. Na základě těchto výsledků bylo zjištěno, že rychlost růstu malých trhlin (0,1 – 1 mm na délku) může být větší než u velkých trhlin (> 1 mm) pro téměř stejnou oblast faktoru intenzity napětí ΔK. Dále si můžeme na obrázku všimnout, že některé malé trhlinky mohou růst v ΔK hodnotách pod hranicí velkých trhlin v oblasti prahové hodnoty růstu únavové trhliny. Pro obě slitiny platí, že rozvoj velkých trhlin se pohybuje při $\Delta K < 5$ MPa.m^{½}, kdežto u malých trhlin již dochází k urychlení růstu.



a) b)

Obr. 17 Průběhy závislostí růstu malých a velkých únavových trhlin v Al slitinách, a) EN-AW-6061/T6, b) EN-AW-7075/T6

Závěr

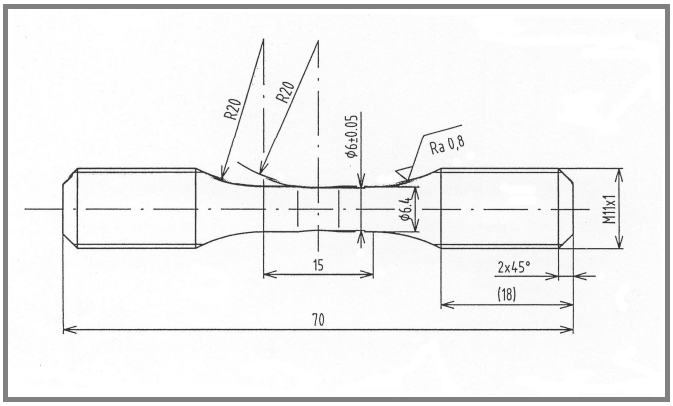
Experimentální výsledky ukázaly, že k únavovému porušení může docházet po překročení hranice 10^7 cyklů a dokonce i po 10^9 cyklů a dále. U žádného ze vzorků nebyla zjištěna viditelná mez únavy až do 10^9 cyklů. Vyšší únavové vlastnosti slitiny EN-AW-7075 vzhledem k EN-AW-6061 by mohly být přisuzovány vyšší pevnosti v tahu matrice.

Bylo také zjištěno, že významné mezifázové dutiny vznikají u těchto dvou slitin na začátku procesu růstu únavové trhliny. Srivatsanova studie [3] ukázala, že výskyt těchto dutin modifikuje okamžitou makroskopickou odezvu Al slitiny EN-AW-7075. Únavové porušování Al slitin by mohlo být přisuzováno tvorbě počtu únavových dutin, jejich růstu a spojování, a následnému vzniku a šíření makroskopických trhlin.

Dále experimentální výsledky ukazují, že rychlost růstu malých únavových trhlin je větší než v případě velkých trhlin pro téměř stejnou oblast faktoru intenzity napětí ΔK a některé malé trhlinky mohou růst v ΔK hodnotách pod hranicí velkých trhlin v oblasti prahové hodnoty růstu únavové trhliny.

Vlastní (z)hodnocení a přínos

Tento článek se zabývá studiem vysokocyklové únavy hliníkových slitin EN-AW-7075 a EN-AW-6061 (obojí T6) a rychlostí růstu malých a velkých trhlin v oblasti prahové hodnoty faktoru intenzity napětí. Předpokládám, že vzorky byly namáhány osově tah/tlak, protože se o tom v článku autoři nezmiňují. Jako zkušební zatěžovací zařízení byl použit piezoelektrický systém, který pracuje na vysokých frekvencích. Zde to bylo na hodnotě 19,5 kHz. Při takto vysoké frekvenci dochází k zahřívání zkušebního vzorku a je nutné chlazení, aby nedošlo k jeho přehřátí. Informace ohledně chlazení zde také nebyla uvedena. Vzhledem k tomu, že se v rámci našich měření zabýváme totožným materiálem (EN-AW-7075) jako autoři tohoto článku včetně stejného tepelného zpracování (T6), dovolím si porovnat výsledky vysokocyklové únavy naše a jejich. Musím ještě podotknout, že tvar vzorků v této práci se od těch našich částečně lišil, ale základní válcový profil s vrubem uprostřed zůstává stejný. Ukázka našeho vzorku viz obr. 18.



Obr. 18 Tvar vzorku z vysokocyklové únavové tahové zkoušky na ÚMVI FSI VUT v Brně [4]

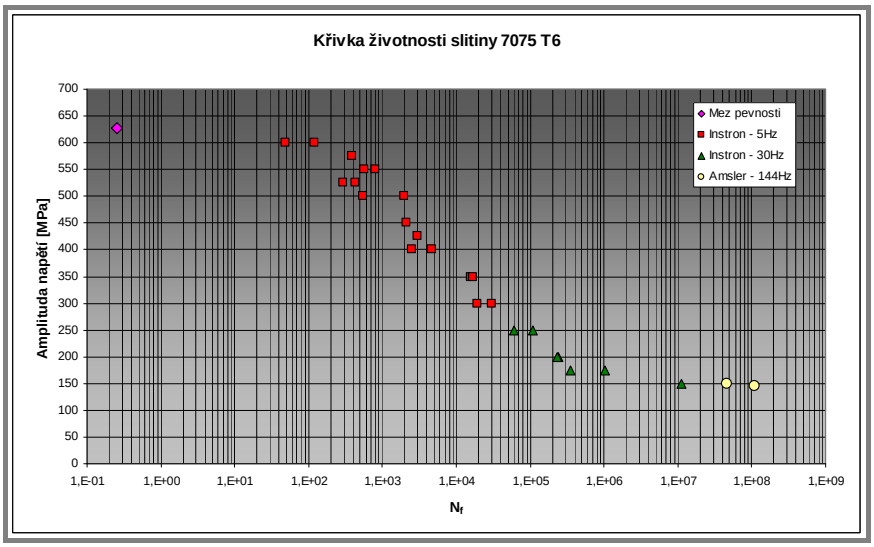
V tomto článku se autoři zmiňují, že při střídavém symetrickém cyklu Al slitiny EN-AW-7075 došlo při zatížení 210 MPa k lomu při 10^7 cyklů. Dále experimentální výsledky ukázaly, že k únavovému porušení dochází i po překročení hranice 10^7

cyklů a dokonce i po 10^9 cyklů. A co je důležité, u žádného ze vzorků nebyla zjištěna viditelná mez únavy až do 10^9 cyklů.

Na základě normy o zkoušení únavy kovů je řečeno, že v případě lehkých kovů a jejich slitin se mez únavy stanovuje při překročení 10^8 cyklů. Tzn., že autoři tuto podmínku splnili nad rámec a mez únavy z jejich grafu (obr. 14) lze odhadnout na hodnotu kolem 205 MPa (EN-AW-7075). Na základě našich měření, lze hodnotu meze únavy při 10^8 cyklů odhadnout kolem 150 MPa (viz. obr. 19). Docházíme k závěru, že rozdíl činí 50 až 55 MPa. To může být dáno např. řádově vyšší frekvencí zatěžovacích cyklů v ultrazvukové oblasti (19,5 kHz) oproti námi použitém vysokofrekvenčním pulsátoru AMSLER 100 kN při 144 Hz a také vlivem zahřívání vzorku.

Vzhledem k tomu, že se jedná o tvářený materiál, který na základě mnoha našich studií je ovlivněn směrovostí struktury (při protlačování), nemůžeme hovořit o spolehlivém porovnání, protože autoři v tomto článku vliv této skutečnosti neuvádějí.

Obrázky lomových ploch, resp. charakter lomových ploch lze označit opravdu za transkrystalický, i když jak píší autoři, s kombinací interkrystalického. K obdobným výsledkům jsme dospěli také v našich studiích.



Obr. 19 Celá oblast únavové životnosti Al slitiny EN-AW-7075/T6 [4]

Jako cenný přínos bych mohl označit informace o dalším, pro mě novém způsobu cyklického zatěžování, a to použití ultrazvukového systému, umožňujícího pracovat při velmi vysokých frekvencích (řádově desítky kiloherz). Dále hodnotné jsou informace o tom, že i po tak velké únavové životnosti (10^8 až 10^9) může docházet k další cyklické degradaci. V této práci se autoři také zabývají průběhem nebo rychlostí růstu únavových trhlin (malých a velkých). Tato oblast byla pro mě nová a může sloužit k dalšímu širšímu pohledu na problematiku tvorby a šíření trhlin v materiálu.

SONSINO, C. M. Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety. *In: International Journal of Fatigue.* Vol. 29, No. 12, pp. 2246-2258, 2007.

Tradiční nebo obecné návody pro návrh konstrukčních součástí se stále opírají o všeobecně známý předpoklad, že existuje mez únavy daného materiálu. Nicméně řady výzkumů zřetelně naznačují, že v režimu vysokocyklové únavy dochází se zvyšujícím se počtem cyklů ke snížení únavové pevnosti, i když jsou potlačeny další vlivy, jako je koroze nebo vliv teploty. Proto se musí zvážit stanovení únavy součástí, podrobených zatížením, pod zlomovým bodem S-N křivky, za účelem vyhnutí se porušení. Vzhledem k průběhu S-N křivky ve vysokocyklové únavě, je zde konstruktérům navrhnuto několik doporučení, týkajících se vhodné volby materiálu.

V práci jsou představeny výsledky nestandardního výzkumu velmi dlouhé únavové životnosti materiálů až do 10^{11} cyklů. Snižování únavové pevnosti je patrně způsobeno stálým porušováním mikrostruktury v materiálu. Z toho vyplývá, že reálnou „mez únavy“ lze určit tehdy, jestliže se v mikrostruktuře nenacházejí defekty způsobující poškození ani žádné agresivní vlivy ovlivňující stav povrchu součásti.

Experiment

Práce předkládá ukázky Wöhlerových křivek deseti zkoumaných materiálů, uvedených v tab. 4, často aplikovaných v automobilovém a leteckém průmyslu. Autor se pokusil o nové zhodnocení a návrhy sklonu a zlomových bodů Wöhlerových křivek v logaritmickém měřítku. Kritéria porušení znázorněných výsledků zkoušek je úplný lom vzorku. Rychlost šíření trhliny, stejně jako doba šíření do vzniku počáteční velikosti trhliny 0,5 mm a větší, nebyla v tomto článku uvažována.

Zatímco tradiční servo-hydraulické, rezonanční a elektromagnetické únavové stroje pracují s maximální frekvencí až 400 Hz, ultrazvukové zkušební stroje dovolují pracovat s frekvencí až 40 kHz a tím můžeme provádět zkoušky v oblasti 10^9 až 10^{12} cyklů. Tento způsob testování obnáší ale několik omezení, jako např. použití zkušebních vzorků jen do průměru d < 10 mm, nutnost chlazení díky zahřívání jádra vzorku vysokou frekvencí a další.

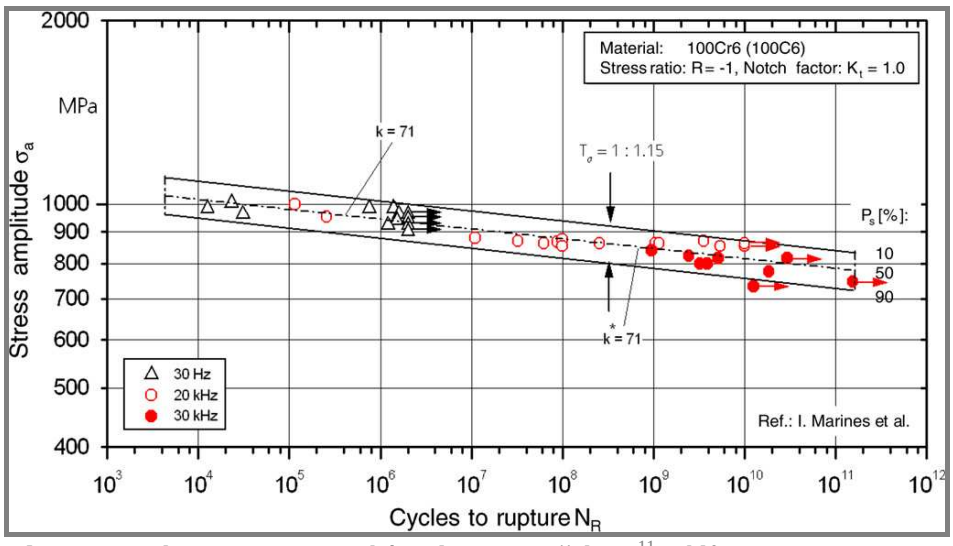
Tab. 4 Zkoumané materiály a jejich základní mechanické charakteristiky

Materiál	DIN kód	Mezinárodní norma	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	E [GPa]	tvrdost
1	***38 MnVS6 BY***	NF EN 10267	608	878	210	246 HV
2	***GGG50***	NF EN 1563	460	795	170	265 HV
3	***100Cr6***	EN ISO 687-17	-	2300	210	780 HV
4	***G-AlSi5Cu3Mg0.4 T5***	NF EN 1780-2	182	222	72	99 HV
5	***Fe-4.ONi-1.5Cu.0.5Mo+0.5C***	-	-	1005	155	336 HV
6	***AlCuMg2 T351***	AA 2024	352	460	72	128 HV
7	***AlZnMgCu1.5 T66***	AA 7075	606	641	71	185 HV
8	***AlMgSi T6***	AA 6082 T6	240	340	70	-
9	***MgAl9Zn1***	Zn1 AZ 91	139	199	40	68 HV
10	***VDSiCr***	-	-	2216	206	-

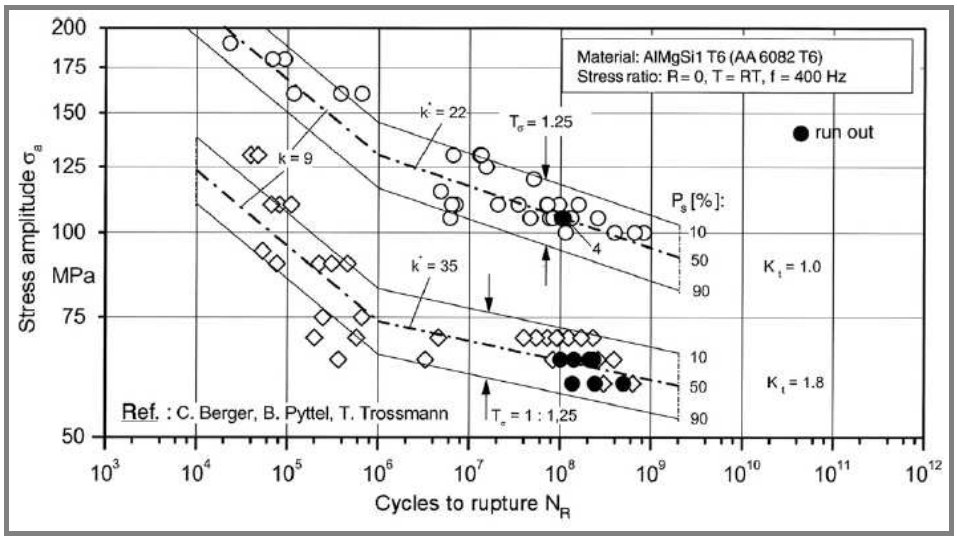
Výsledky

Sklon před a za zlomovým bodem, daný vztahem $k(k^*) = \frac{\lg(N_2 / N_1)}{\lg(\sigma_{a1} / \sigma_{a2})}$, vyplývá z analýzy lineární regrese a také prokládání křivky. Výsledky zkoušek byly pokryty rozptylovými pásy T_σ, založenými na zkušenostech a daném materiálu. Všechny zobrazené Wöhlerovy křivky odhalují plynulý pokles únavové pevnosti v oblasti velkého počtu cyklů. Materiály jako martenzitická ocel 100Cr6 (obr. 20) nevykazují žádný zlomový bod.

Sledované snížení pevnosti za zlomovým bodem nebo ve vysokocyklové oblasti je pod 5% pro ocele a pod 10% pro hliníkové slitiny. Poloha zlomového bodu závisí na materiálu, na jeho pevnosti a také na druhu zatěžování (tahové, ohybové, kroutící). V případě svarů dodatečně na velikosti vnitřního (zbytkového) napětí. Rozptyl T_σ, vázaný k dané střední hodnotě a potřebný k odvození součinitele bezpečnosti, závisí především na jakosti materiálu (čistota, počet defektů, atd.), viz tab. 5.



Obr. 20 S-N diagram martenzitické oceli 100Cr6 až do 10^{11} cyklů



Obr. 21 S-N diagram tvářené hliníkové slitiny AA 6082 až do 10^9 cyklů

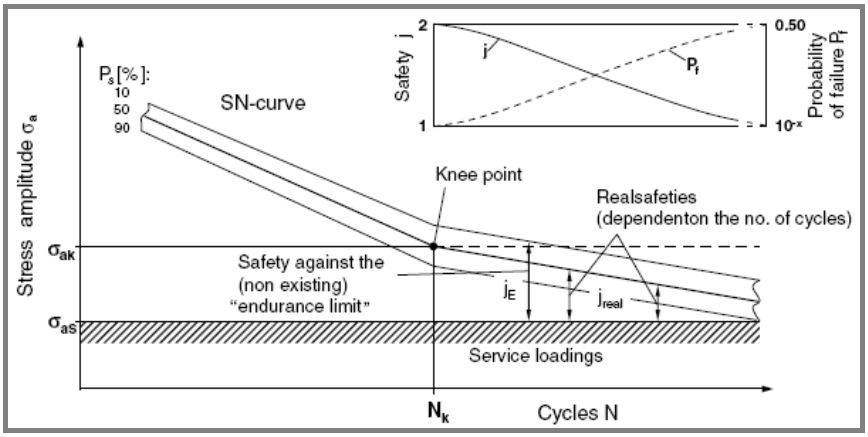
Tab. 5 Doporučené zlomové body, sklony křivek následující po zlomovém bodě a rozptyly

Material	N_k	k^*	Decrease per decade	$1:T_\sigma$
Steel, not welded	5×10^5, high strength 2×10^6, structural steels	45	5	1.20
Steel, welded	1×10^6, thermal stress relieved 1×10^7, high tensile residual stresses	45 22	5 10	1.50
Cast steel	5×10^5, high strength 2×10^6, medium strength	45	5	1.40
Sintered steel	5×10^5, high strength 2×10^6, medium strength	45	5	1.25
Cast nodular iron	5×10^5, high strength 2×10^6, medium strength	45	5	1.40
Wrought aluminium alloys,not welded	1×10^6–5×10^6	22	10	1.25
Wrought aluminium alloys, welded	1×10^6 thermal stress relieved 1×10^7, high tensile residual stresses	22	10	1.45
Cast aluminium	1×10^6–5×10^6	22	10	1.40
Sintered aluminium	1×10^6	22	10	1.25
Wrought magnesium alloys, not welded	5×10^4–1×10^5	45	5	1.20
Cast magnesium	1×10^5–5×10^5	45	5	1.30
Wrought magnesium alloys, welded	5×10^5, low tensile residual stresses 1×10^7, high tensile residual stresses	22	10	1.50

Únavová oblast životnosti $N < N_k$ s $k = 5$ *až 8* je navrhována pro nesvařitelné součásti z oceli, ocelolitiny, spékanou ocel a hliníkovou a hořčíkovou slitinu. Tento stav se může také aplikovat pro tenkostěnné svařitelné součástky zhotovené z oceli a slitin hliníku a hořčíku s k = 5 až 8 a pro svařitelné tlustostěnné komponenty s $k = 3$ *až 5*.

Závěr

Při tradičním stanovení tzv. „meze únavy“ je třeba si na základě získaných poznatků uvědomit, že plynulé snižování únavové pevnosti vede s rostoucím počtem zátěžných cyklů k poklesu skutečné bezpečnosti j_{real} *(N)*, a tím se zvyšuje pravděpodobnost výskytu poruchy P_f, viz obr. 22. Získané výsledky mohou také sloužit jako podklady v oblasti lomové mechaniky.



Obr. 22 Reálné bezpečnosti při návrhu „meze únavy“

Vlastní (z)hodnocení a přínos

Autor se v tomto článku zabývá celkem detailně průběhem únavových křivek různých materiálů. Vyzdvihl jsem zejména chování materiálů neželezných slitin, jako je hliník či hořčík a také pro srovnání chování martenzitické oceli 100Cr6. Na rozdíl od neželezných slitin, tato ocel nevykazuje žádný zlomový bod, jak je zobrazeno na obr. 20. Jako zkušební zařízení byl použit ultrazvukový zkušební systém, dovolující pracovat s frekvencí až 40 kHz a provádějící zkoušky v oblasti 10^9 až 10^{12} cyklů. Zde již nechyběla poznámka o nutnosti chlazení díky zahřívání

jádra vzorku vysokou frekvencí, použití zkušebních vzorků jen do průměru d < 10 mm a další. K všeobecné přehlednosti v oblasti vysokocyklové únavy a stanovení meze únavy patří další informace např. o případech, kdy není možné určovat mez únavy (spojované součásti, korozívní prostředí a další). Jádrem tohoto příspěvku je hodnocení návrhu zlomového bodu, sklonu křivky před a za tímto bodem a rozptylem hodnot. Doporučené hodnoty těchto parametrů u různých materiálů jsou v tab. 5. Je to jistě hodnotná informace k vlastnímu návrhu a realizaci S-N křivky z námi naměřených hodnot v laboratoři. U všech případů byl odhalen plynulý pokles únavové pevnosti v oblasti velkého počtu cyklů, a to zřejmě díky poruše mechanismů v mikrostruktuře. Z toho vyplývá, že reálnou „mez únavy“ lze určit tehdy, jestliže se v mikrostruktuře nenacházejí defekty způsobující poškození ani žádné agresivní vlivy ovlivňující stav povrchu součásti.

LI, T., CHEN, Z., ZHENG, Z., JIANG, X. P., WANG, Q. Y., ZHAI, T. High cycle fatigue properties of an AA 2524 aluminum alloy in four-point bend. *In: 2nd International Conference on Heterogeneous Material Mechanics, June 3. – 8., 2008, Huangshan, China.*

Tato práce se zabývá hodnocením únavových zkoušek hliníkové slitiny EN-AW-2524/T34 za podmínek čtyřbodového ohybu. Vzorky byly orientovány ve směru válcování. Zkoušky proběhly při pokojové teplotě a frekvenci zatěžování 15 Hz s asymetrií cyklu *R = 0,1*. Tato slitina patří do nové generace Al-Cu slitin (letecký průmysl – trupy letadel a další), která se vyvinula z EN-AW-2024/T34. Bylo zjištěno, že „mez únavy" slitiny EN-AW-2524 činila 87% její meze kluzu, což je téměř dvojnásobná hodnota oproti slitině EN-AW-2024. Trhliny vznikaly převážně v místech hrubých zrn, ale také v oblasti hranice zrna. Hrubých částic ve studované slitině bylo mnohem méně než v EN-AW-2024, a to mělo pravděpodobně za následek významně lepší únavové vlastnosti.

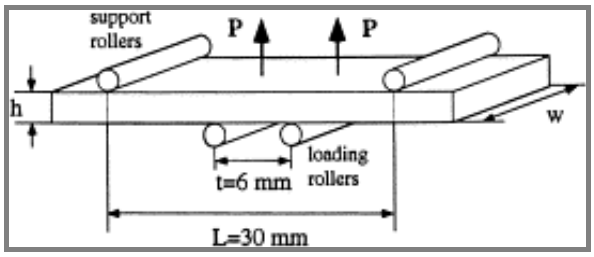
Experiment

Únavové zkoušky Al slitiny EN-AW-2524 za podmínek čtyřbodového ohybu byly zkoumány především kvůli detailnějšímu rozboru vlastností iniciace trhliny, včetně vlivu vlhkosti na únavové vlastnosti.

V tab. 6 je zobrazeno chemické složení této Al slitiny společně s EN-AW-2024. Tvar vzorku pro zkoušku čtyřbodovým ohybem měl rozměry 36,5 x 10 x 4,7 mm (obr. 23). Povrch vzorku byl broušen a mechanicky leštěn. Únavová zkouška probíhala při 15 Hz, pokojové teplotě a 15% vlhkosti vzduchu. Rozsah zátěžného napětí se pohyboval mezi 50% až 140% meze kluzu (374 MPa) a s asymetrií cyklu 0,1. Únavové poškození a lomové plochy byly detekovány optickým a SEM mikroskopem.

Tab. 6 Chemické složení Al slitin AA2524 a AA2024

Materiál (hm. %)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
AA2524	0,07	0,17	4,6	0,64	1,5	0,01	0,10	0,03
AA2024	0,50	0,50	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,10	0,25	0,15

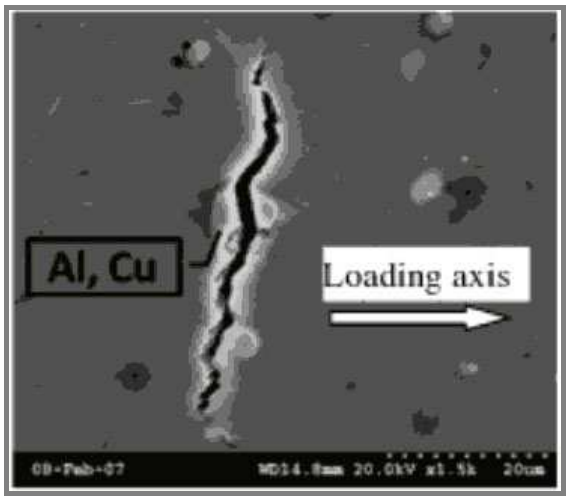


Obr. 23 Geometrie vzorku při zkoušce čtyřbodovým ohybem

Výsledky

Únavová pevnost Al slitiny EN-AW-2524 při 6.10^6 cyklů byla naměřena na hodnotě 87% meze kluzu, což je téměř dvojnásobně větší napětí než v případě EN-AW-2024. Vznik únavových trhlin byl převážně nalezen v místě výskytu hrubých částic, jako Al_2Cu, Al_7Cu_2 (Fe.Mn) a AlCuSi částice. Obr. 24 zobrazuje příklad iniciace trhliny z Al_2Cu částice na povrchu EN-AW-2524 slitiny. V některých

případech nebyla iniciace trhliny viditelná z hrubé částice na povrchu, ale těsně pod povrchem.



Obr. 24 Iniciace trhliny z Al_2Cu částice na povrchu EN-AW-2524 Al slitiny

Na základě pozorování únavové lomové plochy prokázala Al slitina EN-AW-2524 šíření mikrotrhlin krystalograficky v přednostně orientovaných skluzových rovinách. Lomové čáry byly vytvořeny většinou napříč hranic zrn při nejvyšší úrovni napětí 140% meze kluzu, což dokazuje stočení trhlin přes tyto hranice, které představovaly významný odpor vůči růstu trhliny. Tento odpor se často projevuje ve formě „stupňovitých lomů“ v každém zrnu. Při nižších úrovních zatěžovacího napětí, v oblasti raného růstu trhlin, se tyto „stupňovité lomy“ vyskytly v menším počtu. To bylo také mimochodem dáno tím, že si trhlina musela vybrat cestu s minimálním možným odporem ještě předtím, než se z ní stala dlouhá trhlina. V lomových plochách Al slitiny EN-AW-2524 bylo také nalezeno méně porušených částic než ve slitině EN-AW-2024, kde těchto částic bylo více díky větší přítomnosti hrubých částic.

Závěr

Únavová pevnost Al slitiny EN-AW-2524/T34 (při 6.10^6 cyklů) byla stanovena na 87% meze kluzu, což je téměř dvojnásobná hodnota oproti EN-AW-2024/T34. Iniciace únavové trhliny byly převážně z hrubých částic na povrchu nebo těsně pod povrchem materiálu. V Al slitině EN-AW-2524/T34 bylo nalezeno méně hrubých částic, což velkou měrou přispělo k vyšším únavovým vlastnostem.

Vlastní (z)hodnocení a přínos

Autoři článku se zabývají únavovým hodnocením Al slitiny EN-AW-2524/T34 a porovnávají naměřené a získané hodnoty s Al slitinou EN-AW-2024/T34, které se věnovali v předchozím výzkumu. Na základě výsledků se zdá, že hlavně díky nižšímu počtu hrubých částic v matrici vykazuje Al slitina EN-AW-2524 lepší únavové vlastnosti, resp. vyšší únavovou odolnost. To dokládá také naměřená vyšší hodnota meze kluzu 374 MPa. Trochu zavádějící je informace hned na úvod v abstraktu, kde se píše, že mez únavy byla naměřena na hodnotě 87% meze kluzu. V tomto případě by se jednalo o cca 325 MPa, což je dosti vysoká hodnota na slitinu

hliníku s hlavním slitinovým prvkem Cu. Když tedy uvážíme mez únavy při 10^8 cyklů. Po důkladném studiu této práce jsem ale došel k závěru, že tato hodnota platí při 6.10^6 cyklů, a tento fakt také zdůrazňuji v závěru. Je to celkem zřejmé, protože při frekvenci 15 Hz by zkouška trvala několik týdnů, možná i měsíců, až by se dosáhlo 10^8 cyklů.

Hlavní přínos z této práce vidím určitě v tom, že se zde jedná o cyklické namáhání vzorku v ohybu, což jsem v předchozích pracích postrádal a tak můžu chování materiálu, i když z jiné třídy hliníkových slitin, porovnávat s našimi výsledky. Jako další užitečné informace se jistě týkali místa vzniku prvních mikrotrhlin, kterými byli hrubé částice Al_2Cu, Al_7Cu_2 a další.

BERGER, C., PYTTEL, B., TROSSMANN, T. Very high cycle fatigue tests with smooth and notched specimens and screws made of light metal alloys. *In: International Journal of Fatigue.* Vol. 28, No. 11, pp. 1640-1646, 2006.

V této práci jsou prezentovány výsledky několika únavových zkoušek s použitím servohydraulického zkušebního stroje VHF 50D. Výzkumy byly provedeny při pokojové teplotě s:

- hladkými vzorky a vzorky s vrubem ($K = 1,8$) vyrobenými z tvářené hliníkové slitiny EN-AW-6082
- šrouby M8 vyrobenými z hliníkové slitiny EN-AW-6056

Zatěžovací frekvence se pohybovaly mezi 250 a 400 Hz a počet cyklů byl měřen až do $N = 8.10^8$ cyklů. Hodnoty únavové pevnosti byly stanoveny podle stupňovité metody. Místa iniciace trhliny byla zjištěna pod povrchem u hladkých hořčíkových a hliníkových slitin, avšak u šroubů a vzorků s vrubem se místa vzniku trhlin vyskytovala na povrchu součásti.

Výzkumy tvářené hliníkové slitiny byly hlavně provedeny k určení změn únavové pevnosti až do počtu cyklů $N = 8.10^8$ cyklů a lokalizace vzniku trhliny pro vzorky s vrubem a bez vrubu. Cílem výzkumu, zabývajícího se hliníkovými šrouby, bylo zhodnotit chování těchto pro nekonečnou životnost navrhovaných součástí, při počtu cyklů, pro něž není směrnicemi stanoven výpočet šroubových spojů. Doposud jsou šrouby zkoušené jen do $N = 5.10^6$ *nebo* 10^7 cyklů.

Experiment a výsledky prováděné na hliníkové slitině

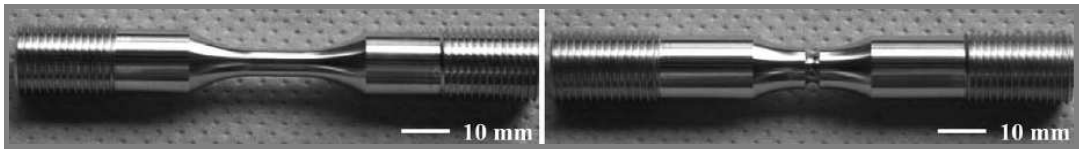
Únavové zkoušky Al slitiny EN-AW-6082 (AlMgSi1T5) byly provedeny při pokojové teplotě. Tab. 7 zobrazuje chemické složení a tab. 8 naměřené základní mechanické charakteristiky. Zde byly zkoumány 2 typy vzorků: vzorky s vrubem (součinitel koncentrace napětí $K_t = 1,8$) a bez vrubu, viz obr. 25.

Tab. 7 Chemické složení tvářené Al slitiny EN-AW-6082 (hm. %)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti
EN-AW-6082	0,7-1,3	<0,5	<0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	<0,2	<0,25	<0,1

Tab. 8 Základní mechanické charakteristiky tvářené Al slitiny EN-AW-6082

	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
EN-AW-6082	341	356	11,2	47,5

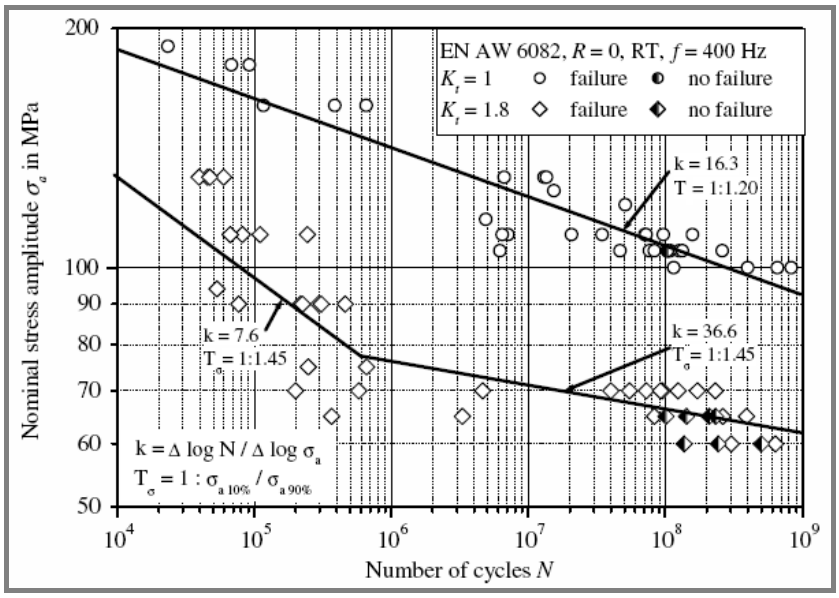


Obr. 25 Tvary vzorků Al slitiny EN-AW-6082, (vlevo) hladký, (vpravo) s vrubem, délka vzorku 110 mm, průměr v měrné části 6 mm

Tahové únavové zkoušky za podmínek $R = 0$ (míjivý cyklus) byly uskutečněny v nízko a vysoko cyklové oblasti s regulací zatížení a zatěžovací frekvencí $f = 400$ *Hz*. V nízkocyklové oblasti se zkoušelo 15 vzorků s vrubem a 10 hladkých na 3 napěťových úrovních. Ve vysokocyklové oblasti byla použita stupňovitá metoda

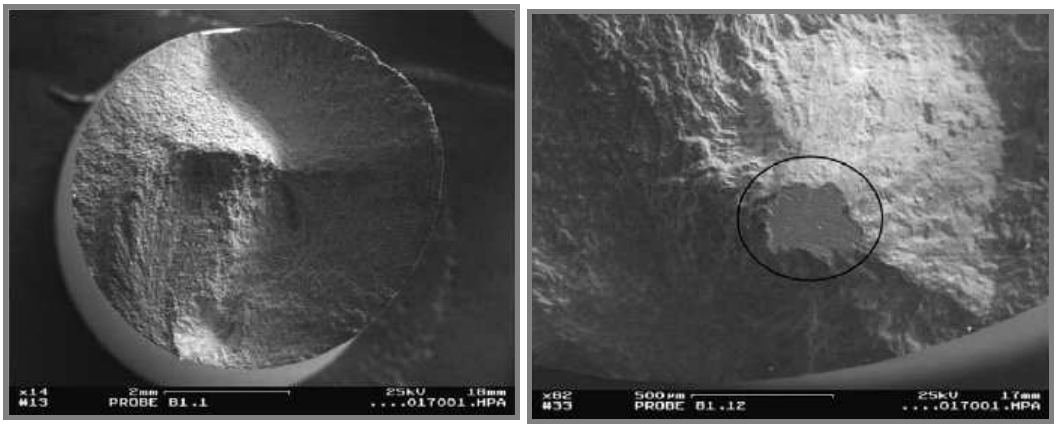
k odhadu únavové pevnosti až do $N = 2.10^8$ cyklů. Zde bylo podrobeno zkouškám 27 vzorků s vrubem a 26 hladkých vzorků.

Experimentální výsledky únavových zkoušek a S-N křivky jsou zobrazeny na obr. 26, včetně sklonu k a velikosti rozptylu napětí T_σ. Není zde viditelná žádná mez únavy u obou typů vzorků, ale odlišný sklon k pro hladké vzorky a vzorky s vrubem.



Obr. 26 S-N diagram Al slitiny EN-AW-6082

Místo iniciace trhliny pro hladké vzorky při vyšším počtu cyklů (přibližně $N > 7.10^6$ cyklů) bylo vždy pod povrchem ve vzdálenosti několika 10 µm až 1 mm, viz obr. 27 vlevo.

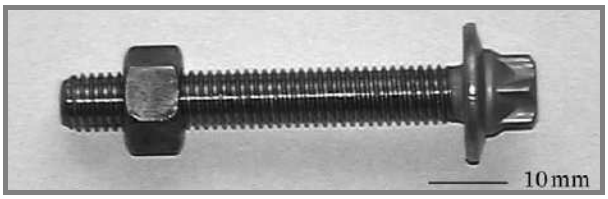


Obr. 27 Typická lomová plocha hladkého vzorku Al slitiny EN-AW-6082, σ_a = 110 MPa, N = 1,6.10^8 cyklů (vlevo), detail místa iniciace trhliny hladkého Al vzorku EN-AW-6082, σ_a = 130 MPa, N = 6,6.10^6 cyklů (vpravo)

Při nižším počtu cyklů (přibližně $N < 7.10^6$ cyklů) trhlinky vznikaly na povrchu. V případě vzorků s vrubem vznikaly trhlinky vždy na povrchu, tedy při vysokocyklové únavě.

Experiment a výsledky prováděné na hliníkových šroubech

Únavové zkoušky se šrouby M8, vyrobenými z Al slitiny EN-AW-6056 (AlMg1SiCu) v kombinaci s maticemi Al9 (EN-AW-6056), viz obr. 28, byly provedeny opět na vzduchu a při pokojové teplotě. V tab. 9 je zobrazeno chemické složení a tab. 10 zobrazuje základní mechanické charakteristiky zkoušených šroubů.



Obr. 28 Šroub M8 a matice z Al slitiny EN-AW-6056

Tab. 9 Chemické složení tvářené Al slitiny EN-AW-6056 (hm. %)

	Mg	**Mn**	**Zn**	**Si**	**Cu**	**Ni**	**Fe**	**Ti**	**Cr, Pb, Sn**
EN-AW-6056	0,897	0,549	0,206	0,974	0,749	<0,01	0,17	0,001	<0,005

Tab. 10 Základní mechanické charakteristiky šroubů M8 (EN-AW-6056)

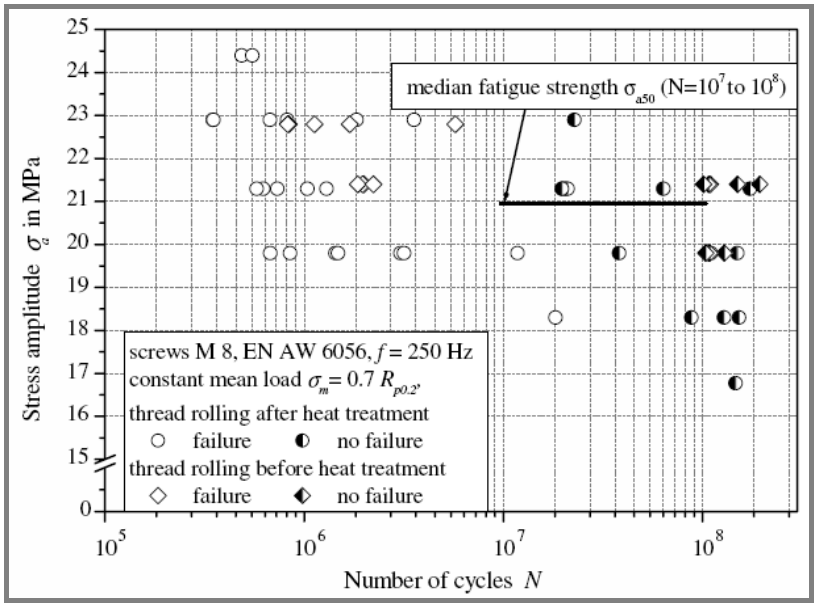
EN-AW-6056	**$R_{p0,2}$ [MPa]**	**R_m [MPa]**
Válcování závitů po tepelném zpracování	369	435
Válcování závitů před tepelným zpracováním	352	412

Konkrétně bylo tedy zkoumáno 19 šroubů s válcovanými závity před tepelným zpracováním a 36 šroubů s válcovanými závity po tepelném zpracování. Únavové zkoušky tahem byly provedeny se stálým středním zatížením rovnajícím se 70% meze kluzu ($R_{p0,2}$) podle ISO 3800 při frekvenci $f = 250$ *Hz*.

Experimentální výsledky z únavových zkoušek šroubů jsou na obr. 29. K lomům docházelo až do $N = 2.10^7$ cyklů, a pak od $N = 2.10^7$ až 2.10^8 již vzorky vydržely bez porušení. Porušení vznikalo vždy na povrchu součásti, což je způsobeno vysokou koncentrací napětí v drážce závitu. K lomu dochází obyčejně v prvním záběrném závitu s maticí se součinitelem koncentrace napětí $K_t \approx 4$ *až* 10. Amplituda napětí střední únavové pevnosti pro $N = 10^7$ *a* 10^8 cyklů pro oba typy šroubů je σ_{a50} = 21 MPa. Výpočet amplitudy napětí je založen na ploše průřezu při nominálním průměru závitu šroubu $A_{d3,nom}$ (pro M8 je $A_{d3,nom} = 32{,}8\ mm^2$).

Podle VDI 2230 je únavová pevnost u ocelových šroubů při $N = 2.10^6$ cyklů přibližně o 30% vyšší u tvářených závitů po tepelném zpracování ve srovnání se závity před tepelným zpracováním. Výzkumy na hliníkových šroubech analogii nepotvrdily.

Únavové zkoušky se stejnými šrouby, ale s frekvencí $f = 25$ a 150 *Hz*, které proběhly na jiném zkušebním zařízení až do $N = 10^7$ cyklů, neukázaly významné frekvenční závislosti s výsledky z předchozích zkoušek.



Obr. 29 S-N diagram šroubů M8 ze schodovitých zkoušek Al slitiny EN-AW-6056 ($\sigma_a = F_a/A_{d3}$, $A_{d3,nom}$ = 32,8 mm^2)

Závěr

Základní výsledky výzkumů prováděných na hliníkových vzorcích a hliníkových šroubech jsou shrnuty následovně:

1) V případě hliníkových vzorků EN-AW-6082 nebyla při daném počtu cyklů zjištěna žádná mez únavy jak na hladkých tak i na vzorcích s vrubem. Trhliny vznikaly u vzorků s vrubem vždy na povrchu. U hladkých vzorků se iniciace trhlinky přemístila pod povrch a to při velmi vysokém počtu cyklů. To je pravděpodobně dáno tím, že se na povrchu součásti nevyskytují žádné vměstky nebo defekty, způsobující vznik trhlin.

2) U šroubů, vyrobených z Al slitiny EN-AW-6056, docházelo k únavovému porušování až do $N = 2.10^7$ cyklů. Při vyšším počtu cyklů se již lomy netvořily. Nebyl zjištěn významný rozdíl střední únavové pevnosti, hodnocené podle stupňovité metody, při přerušení zkoušek za $N = 2.10^7$ cyklů nebo 2.10^8 cyklů.

Vlastní (z)hodnocení a přínos

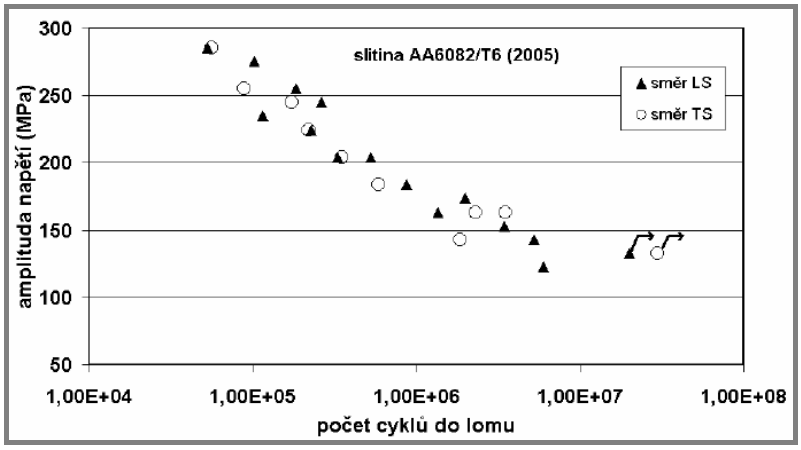
Článek se zabývá únavovým hodnocením dvou hliníkových slitin, EN-AW-6082 a EN-AW-6056. K únavovým zkouškám bylo využito nového servohydraulického měřicího zařízení, pracující v režimu tah-tlak a umožňující vykonávat cyklické zatížení až při 400 Hz frekvenci. Jako zkušební tělesa byly použity vzorky hladké a s vrubem a dále hliníkové šrouby.

Co je zajímavé, i při dosažení vysokého počtu cyklů ($N = 8.10^8$ cyklů) v případě hladkých vzorků EN-AW-6082, nebyla zjištěna mez únavy, protože i při tak vysokém počtu cyklů stále docházelo (až na jeden nebo dva případy) k lomům vzorků. Když tyto výsledky srovnáme s naším základním výzkumem Al slitiny EN-AW-6082/T6 s rozdílem, že:

- zkoušky probíhaly za podmínek čtyřbodového ohybu (v článku tah-tlak)
- zkušební materiál se nacházel ve stavu T6 (v článku T5),

zjistíme, že už při dosažení cca $N = 4.10^7$ cyklů ve směru TS, LS nedocházelo k dalšímu únavovému porušování, viz obr. 30 [5]. Je nutno ale připomenout, že

v článku nebyla žádná zmínka o směrovosti struktury při výrobě vzorků této slitiny a tudíž rozdíly v odlišném tepelném zpracování T5 (ochlazený ze zvýšené teploty tváření a uměle stárnutý) a jiný režim zatěžování mají pravděpodobně velký vliv při posuzování únavové odolnosti zkoušeného materiálu [6].



Obr. 30 S-N závislost pro materiál EN-AW-6082/T6 [5]

Závěr tohoto typu výzkumu je ten, že sice u obou druhů vzorků (hladné a s vrubem) nedosáhneme meze únavy při $N = 8.10^8$ cyklů, ale získáme důležité informace o charakteru sklonu proložených křivek a jejich pozici v S-N diagramu.

Důležité jsou také informace o přesné lokalizaci místa, kde vznikaly první únavové mikrotrhlinky. U hladkých vzorků, kterými se především zabýváme při našich výzkumech, vznikaly trhliny v oblasti vysokocyklové únavy „těsně“ pod povrchem, cca 10µm až 1 mm. Z našich snímků je ale patrné, že charakter oblasti a vzniku šíření únavových trhlin je přibližně totožný se snímky v článku.

Velmi hodnotné a zajímavé jsou také informace a výsledky z únavových zkoušek hliníkových šroubů, kde autoři došli k závěru, že šrouby s tvářenými závity po tepelném zpracování vykazují nižší únavovou pevnost oproti šroubům se závity před tepelným zpracováním. U ocelových šroubů je efekt opačný. K lomům docházelo až do $N = 2.10^7$ cyklů, a pak od $N = 2.10^7$ až 2.10^8 již vzorky vydržely bez porušení. Jak se očekávalo, ke vzniku trhlin docházelo vždy na povrchu součásti, což je způsobeno vysokou koncentrací napětí v drážce závitu.

BYSTRITSKII, V., GARATE, E., EARTHMAN, J., KHARLOV, A., LAVERNIA, E., PENG, X. Fatigue properties of 2024-T3, 7075-T6 aluminum alloys modified using plasma-enhanced ion beams. *In: Theoretical and Applied Fracture Mechanics.* Vol. 32, No. 1, pp. 47-53, 1999.

Tento článek představuje experimentální výsledky aplikace Microsecond Plasma Opening Switch (MPOS) technologie, používané na modifikaci povrchu hliníkových slitin. Jedná se o technologii využívající iontové svazky pod proudem okrajového plazmatu, které ozařují povrch materiálu a tím dochází ke změně kvality povrchu materiálu. Hlavním cílem tohoto výzkumu bylo studium změn tahových a únavových vlastností Al vzorků EN-AW-2024/T3 a EN-AW-7075/T6, které byly ozářeny touto technologií. Únavové zkoušky v ohybu byly provedeny na vzduchu a v korozivním prostředí. U zkoušek v atmosférickém prostředí se zjistilo, že tato technologie úpravy povrchu nemá výrazný vliv na únavové vlastnosti obou slitin. Avšak v korozivním prostředí výsledky měření ozářených vzorků naznačují významné zlepšení únavových vlastností zvláště u Al slitiny EN-AW-7075 (1,5 krát vyšší mez únavy).

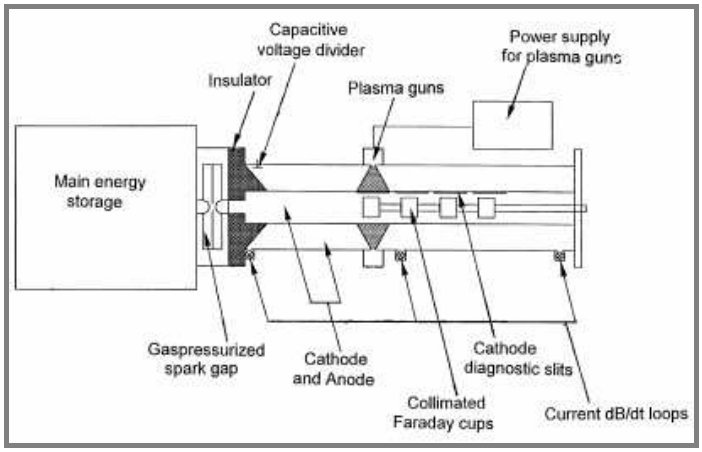
Experiment

V tomto článku je věnována hlavní pozornost měření únavy v ohybu Al slitiny EN-AW-2024/T3 Alclad (4,4% Cu, 0,6% Mn, 1,5% Mg a 40 µm povlak čistého hliníku 99,3% na obou stranách) a EN-AW-7075/T6 (1,6% Cu, 2,5% Mg, 0,23% Cr, 5,6% Zn, bez povlaku) s tloušťkou pro obě slitiny 1,6 mm.

Obr. 31 zobrazuje schéma experimentálního zařízení použitého v této práci. Jedná se o souosý systém s celkovou indukčností 400 nH a následujícími parametry:

- nabíjecí napětí 30 – 45 kV
- akumulovaná energie až 150 kA
- doba náběhu ≈ 1 µs (se spojením indukčnosti jako zatížení)

Celkový iontový proud byl asi 25 kA. Složení iontových svazků se skládalo převážně z protonů a uhlíkových iontů (každého asi 50%). Vzorky určené k experimentu byly umístěny na katodu. Průměr katody byl 50 mm a anody 200 mm. Užitečná délka MPOS byla asi 15 cm a celková plocha pro ozařování přibližně 200 cm^2.

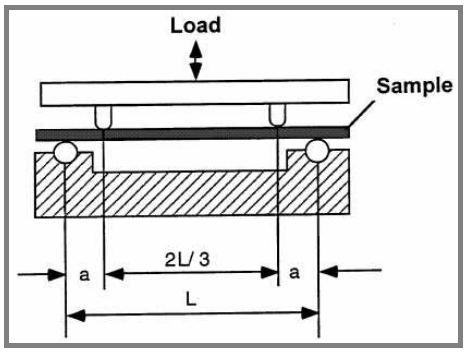


Obr. 31 Základní schéma experimentálního zařízení

Mikrostruktura upraveného povrchu a řezy vzorků byly pozorovány optickým mikroskopem Axioplan s Zeiss optikou a Philips EL30 Field Emission Scanning

Electron Microscope. Měření zkoušky tahem probíhalo na servo-hydraulickém zkušebním stroji dle ASTM E8 (Metodika zkoušení tahem kovových materiálů).

Uspořádání únavové zkoušky a tvar vzorku je zobrazen na obr. 32. Konstantní hodnota amplitudy byla řízena PC se zatěžovací frekvencí $f = 30\ Hz$ a asymetrií cyklu $R = 0{,}1$ (pulsující cyklus).



Obr. 32 Schéma uspořádání únavové zkoušky v režimu čtyřbodového ohybu ($L = 45\ mm$, šířka vzorku $b = 4\ mm$)

Únavové zkoušky v korozním prostředí byly provedeny ponořením experimentální sestavy (obr. 32) do solné komory s 2,9% koncentrací vodného roztoku NaCl, která je blízká mořské vodě. Během zkoušky byla horní část komory otevřená. Ostatní únavová a tahová měření byla provedena při pokojové teplotě v laboratoři (~ 20 °C).

Výsledky

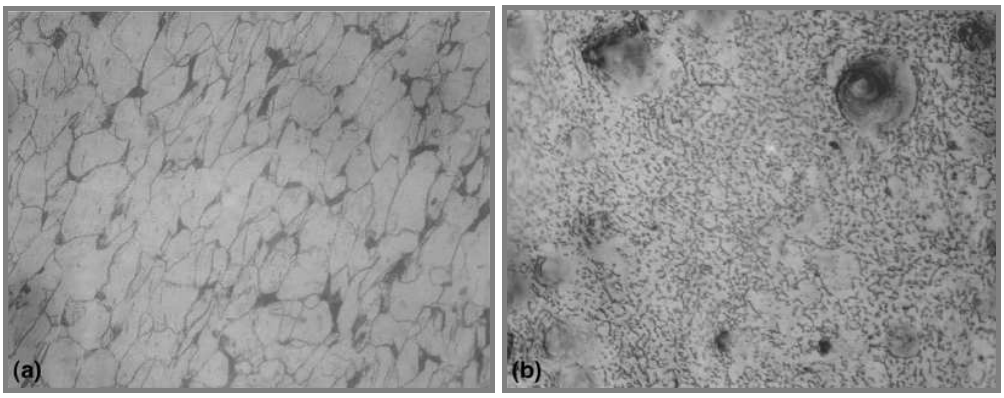
Základní mechanické charakteristiky obou slitin jsou uvedeny v tab. 11. Můžeme si všimnout, že se mez pevnosti v tahu u obou slitin, jak ve stavu ozářeném tak neozářeném, mění jen ve velmi malém rozsahu (cca 15 MPa). Zdá se, že aplikace iontových svazků na povrch vzorku měla zanedbatelný vliv na statické mechanické vlastnosti obou slitin. To je celkem pochopitelné, protože iontové svazky procházejí do hloubky materiálu jen několik mikrometrů a tento fakt nemůže ovlivnit pevnost materiálu, mající objemový charakter. To také naznačuje, že míra zbytkových napětí ozářených vzorků je mnohem menší než mez pružnosti.

Tab. 11 Základní mechanické charakteristiky slitin EN-AW-2024/T3 a EN-AW-7075/T6

Vzorek	Ozáření [A/cm^2]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]
EN-AW-2024	neozářeno	448	308	16,9
	60	457	313	17,7
	80	445	306	16,7
	100	455	307	17,5
EN-AW-7075	neozářeno	590	515	12
	60	580	512	12,7
	80	594	516	12,5
	100	610	524	11,8

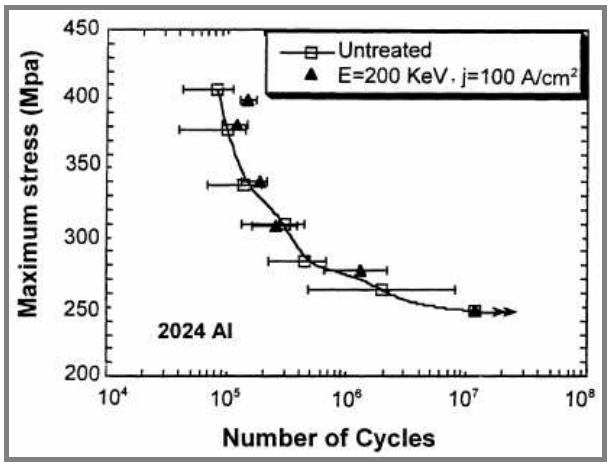
Optické a SEM snímky názorně ukázaly, že morfologie a mikrostruktura oblasti povrchové vrstvy poznamenané iontovým zásahem je velmi odlišná od oblasti bez

zásahu. Názorné optické snímky (x500) nedotčeného a ozářeného povrchu Al slitiny EN-AW-2024 jsou zobrazeny na obr. 33(a) a (b). Povrch neozářeného vzorku (obr. 33a) znázorňuje typickou protáhlou zrnitou strukturu s rozměrem zrna asi 60 µm v podélném a 30 µm v příčném směru. Kdežto povrch ozářeného vzorku (obr. 33b) zrnitou strukturu při tomto zvětšení neukazuje.



Obr. 33 Snímky neozářeného povrchu (a) a ozářeného povrchu (b) slitiny EN-AW-2024

Únavové zkoušky v atmosférickém prostředí byly měřeny na vzorcích bez ozáření a s ozářením (proudová hustota 60, 80 a 100 A/cm^2) pro obě slitiny. U slitiny EN-AW-2024 byly získané S-N křivky téměř shodné jak pro ozářené s proudovou hustotou 60 A/cm^2 tak pro neozářené vzorky. U ozářených vzorků s proudovou hustotou iontů 80 a 100 A/cm^2 byla únavová životnost při vyšší úrovni napětí (mezi 340 a 410 MPa) asi o 30 – 40% větší než u vzorků neozářených. Příklady S-N křivek nemodifikovaných a ozářených vzorků se 100 A/cm^2 proudovou hustotou jsou zobrazeny na obr. 34.

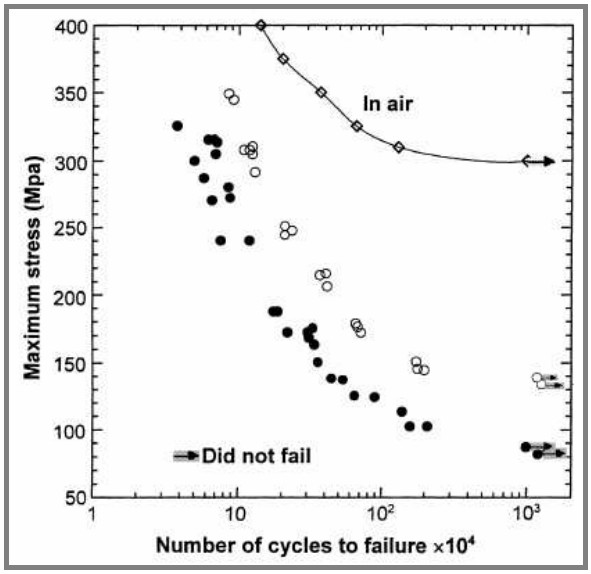


Obr. 34 S-N křivky získané ze zkoušek únavy v ohybu Al slitiny 2024/T3 Alclad

Vliv MPOS technologie v atmosférickém prostředí byl u slitiny EN-AW-7075 téměř identický jako u vzorků z první slitiny.

Na obr. 35 jsou konečně zobrazeny S-N křivky slitiny EN-AW-7075/T6 neozářených a ozářených vzorků (proudová hustota 80 – 100 A/cm^2), získané ze zkoušek v korozním prostředí. Plná čára nahoře v grafu reprezentuje křivku měřenou

na vzduchu (statisticky stejnou pro ozářené a neozářené vzorky). Únavová pevnost při 10^7 cyklů je u neozářených vzorků cca 87 MPa a u ozářených MPOS asi 135 MPa (únavová pevnost vzorků na vzduchu je kolem 300 MPa).



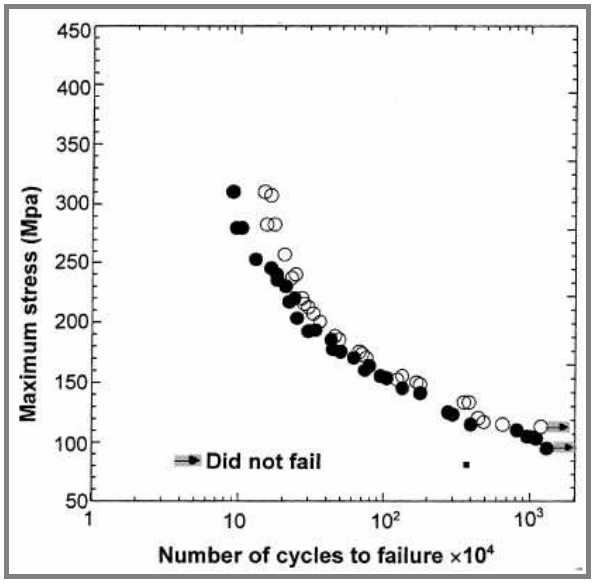
Obr. 35 S-N křivky Al slitiny EN-AW-7075 získané z únavových zkoušek v ohybu v solné komoře s 2,9% koncentrací vodného roztoku NaCl; ○ ozářené MPOS, ● neozářené vzorky; horní křivka je únava měřená na vzduchu pro oba typy vzorků

Tab. 12 pak udává únavové pevnosti této slitiny při 10^7 cyklů a různých provozních podmínkách: únava na vzduchu, s 2,9% koncentrací vodného roztoku NaCl a na vzduchu se zkorodovanými vzorky (72 h v totožném roztoku).

Tab. 12 Mez únavy Al slitiny EN-AW-7075/T6 při 10^7 cyklů a různých provozních podmínkách [v MPa]

Provozní stav	**Neozářeno**	**Ozářeno [100 A/cm^2]**
na vzduchu	300	300
zkorodované na vzduchu (72 h)	170	190
v solné komoře s 2,9% koncentrací vodného roztoku NaCl	87	135

MPOS účinek na korozní únavu u slitiny EN-AW-2024 není tak významný jako u EN-AW-7075. O tom vypovídá obr. 36, zobrazující S-N závislosti slitiny EN-AW-2024 získané ze zkoušek v solné komoře vzorků neozářených a ozářených s proudovou hustotou iontů 80 – 100 A/cm^2. Průběh je kvalitativně podobný u obou typů vzorků, jen při vyšší úrovni napětí (240 – 340 MPa) je životnost ozářených vzorků asi o 30 – 40% větší než u vzorků neozářených. Únavová pevnost při 10^7 cyklů je v korozním prostředí mírně vyšší (113 MPa) u ozářených vzorků v porovnání s neozářenými (103 MPa). Malý vliv MPOS záření při nízkých napětích na únavové vlastnosti této slitiny je pravděpodobně dán kvůli vysoké odolnosti proti korozi krycí vrstvy z Alclad materiálu (Al slitina s povlakem čistého Al).



Obr. 36 S-N křivky Al2024-T3 Alcad slitiny získané z únavových zkoušek v ohybu v solné komoře s 2,9% koncentrací vodného roztoku NaCl; ○ ozářené MPOS, ● neozářené vzorky

Závěr

Tento článek poskytuje detailní informace o měření únavy Al slitin EN-AW-2024/T3 Alclad a EN-AW-7075/T6 při atmosférických podmínkách a v korozním prostředí. Důležité výsledky jsou následující:

- aplikace iontových svazků na povrch vzorku měla zanedbatelný vliv na statické mechanické vlastnosti obou slitin
- únavové vlastnosti obou slitin jsou na vzduchu téměř stejné jak pro ozářené tak i neozářené vzorky
- po cyklickém zatížení ozářených vzorků v korozivním prostředí došlo především u slitiny EN-AW-7075 k výraznému zlepšení korozních únavových vlastností, u EN-AW-2024 byla mírně zvýšena únavová životnost pouze při vyšších úrovních napětí

Vlastní (z)hodnocení a přínos

Hlavním přínosem toho článku jsou nové informace z oblasti úpravy povrchu materiálu, konkrétně modifikace povrchu technologií MPOS. Jedná se o vytváření iontových svazků pod proudem okrajového plazmatu během rychlého přechodu plazmy z propustného stavu do stavu vysoké impedance.

Únavová pevnost značně závisí na kvalitě povrchu, to je velmi důležitý poznatek. Z toho vyplývá, že malé povrchové defekty (několik mikrometrů do hloubky) způsobují velké snížení únavové pevnosti ve srovnání s leštěným povrchem vzorku.

Vzhledem k tomu, že většina konstrukčních součástí je vystavována agresivnímu prostředí, je nutno se zabývat otázkou, jak čelit těmto vlivům a jak zvyšovat odolnost materiálů vůči koroznímu prostředí. Autoři tohoto článku se právě tímto problémem zabývali, a to s aplikací již zmíněné technologie úpravy povrchu MPOS, od které očekávali, že zlepší únavovou odolnost a pevnost vůči korozivnímu prostředí. Jako

zkušební materiál využili Al slitiny EN-AW-7075/T6 a EN-AW-2024/T3 Alclad, která je typická tím, že obsahuje 40 µm povlak 99,3% čistého hliníku.

Jak již bylo zmíněno v článku, aplikace iontových svazků na povrch materiálu mění jeho vlastnosti a právě tento zásah pravděpodobně má vliv na změnu únavových vlastností. To dokazují odlišné fotografie mikrostruktury povrchu neozářených a ozářených vzorků. Co je konkrétně příčinou zvýšení protikorozní ochrany z pohledu mikrostruktury, to není v článku detailně vysvětleno.

Z výsledků v tab. 11 vyplývá, že statické mechanické vlastnosti (mez pevnosti v tahu, v kluzu a tažnost) se u ozářených a neozářených vzorků obou materiálů moc nemění.

Pozitivnější a nadějnější výsledky tohoto výzkumu přišly ze zkoušek únavy v ohybu. V atmosférickém prostředí byly u slitiny EN-AW-2024 získané S-N křivky téměř shodné jak pro ozářené s proudovou hustotou 60 A/cm^2 tak pro nemodifikované vzorky. U ozářených vzorků s proudovou hustotou iontů 80 a 100 A/cm^2 byla únavová životnost při vyšší úrovni napětí (340 až 410 MPa) asi o 30 – 40% větší než u vzorků neozářených. S-N křivky nemodifikovaných vzorků, získané ze zkoušek únavy slitiny EN-AW-7075 byly také téměř shodné jako u vzorků ozářených s proudovou hustotou mezi 60 a 100 A/cm^2.

Především únavové zkoušky slitiny EN-AW-7075, provedené v korozním prostředí při 2,9% koncentraci vodného roztoku NaCl, dokazují zvýšenou únavovou odolnost ozářených vzorků technologií MPOS oproti vzorkům původním. Autoři uvádějí, že únavová pevnost při 10^7 cyklů je u neozářených vzorků cca 87 MPa a u ozářených asi 135 MPa, což je celkem podstatný rozdíl.

Účinek MPOS technologie při únavových zkouškách v korozním prostředí EN-AW-2024 slitiny není tak zřetelný, zvláště při nízkých napětích, což je dáno pravděpodobně vysokou odolností krycí vrstvy Alclad materiálu.

Závěry z tohoto výzkumu tedy zní, že existují technologie určené k modifikaci povrchu, pomocí kterých lze prodloužit životnost hliníkových slitin během cyklického zatěžování, zvláště v korozivním prostředí. A právě výsledky aplikace technologie MPOS dokazují, že především u Al slitin, které neobsahují povrchovou krycí vrstvu, může tato technologie pomoci k prodloužení únavové životnosti v korozivním prostředí.

3.2 Aplikace metody akustické emise při výzkumu únavových vlastností neželezných slitin

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.

Na následujících stranách jsou představeny odborné články, zabývající se aplikací metody akustické emise při výzkumu únavových vlastností konstrukčních materiálů.

HUANG, M., JIANG, L., LIAW, P. K., BROOKS, CH. R., SEELEY, R., KLARSTROM, D. L. Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research. *In: JOM*. Vol. 50, No. 11, November 1998.

Akustická emise (AE) je nedestruktivní metoda, určená ke kontrole a monitorování tvorby defektů a porušení v konstrukčních materiálech. Byla vyvinuta pro kontrolu mnoha konstrukčních součástí, jako parní trubky, tlakové nádoby, dále ve výzkumných oblastech hornin, kompozitních materiálů a kovů. V tomto článku jsou popsány základní pojmy, názvosloví, teoretické modelování a běžné přístrojové nastavení související s aplikací AE. Výzkumy, zabývající se využitím AE, analyzují časový průběh signálu AE jako funkci zdrojů a mechanismů šíření vln. Metoda AE se především uplatnila jako efektivní způsob k odhalování únavového a lomového chování materiálů.

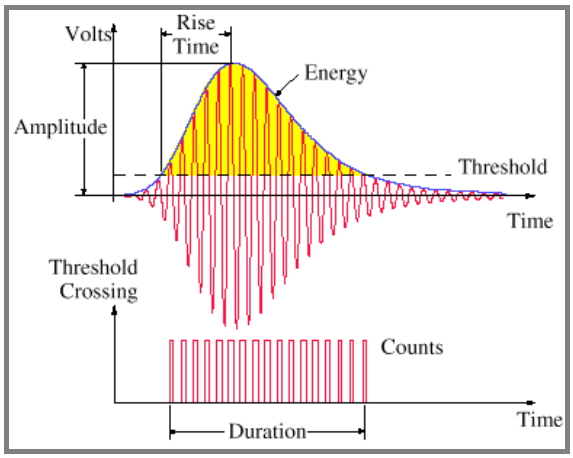
Experiment

Výzkum AE může být obecně rozdělen do dvou kategorií:

- tradiční akustická emise
- Greenova funkce a analýza tvaru vlny

Metoda tradiční AE zachycuje určité parametry (někdy nazývané AE charakteristiky), zahrnující AE county, vrcholové hladiny a energii. Tyto AE charakteristiky pouze detekují signál ve zkoumaném materiálu a neurčují zdroj signálu a šíření vln.

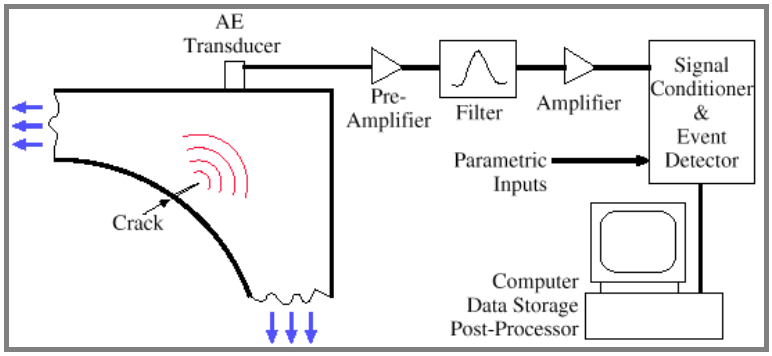
Obr. 37 znázorňuje typický příklad časového průběhu signálu (emisní události) a běžně užívané parametry metody AE. Jestliže snímač zachytí signál nad jistou hladinou citlivosti (prahovou úrovní), je zaznamenána událost AE. Amplituda události je definována jako špička v signálu. Interval mezi prvním překmitem signálu přes prahovou úroveň a posledním překmitem je označována jako délka události AE. Úsek mezi prvním překmitem signálu přes prahovou úroveň a maximální amplitudou signálu je nazván jako doba náběhu signálu (rise time). Oblast pod obálkou události AE je energie.



Obr. 37 Typický příklad časového průběhu signálu AE

Obr. 38 názorně představuje základní rozmístění jednotlivých prvků při měření AE. K detekci signálu AE se nejčastěji používají velmi citlivé piezoelektrické

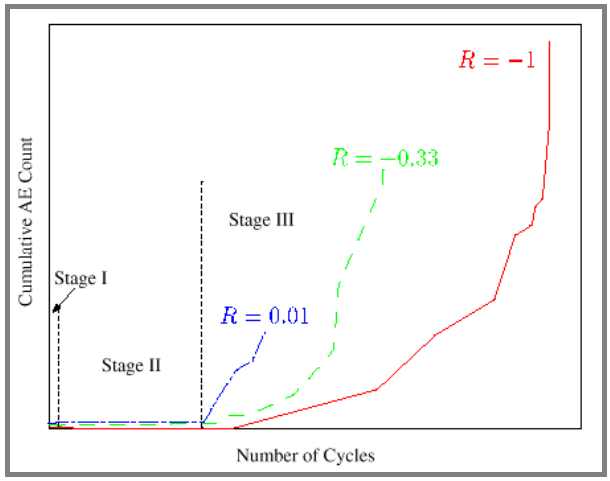
snímače. Emisní signál je většinou velmi slabý, proto se hned za snímač připojuje předzesilovač, který minimalizuje interferenční šum a předchází ztrátám v signálu. Poté signál projde filtrem k odstranění šumu a je zesílen hlavním zesilovačem. Následuje načtení a uložení AE parametrů do PC k další analýze. Během výzkumu mohou být samozřejmě zaznamenány další vstupní parametry, jako zatížení, deformace, tlak, teplota a další.



Obr. 38 Základní schéma měření AE

Únavové zkoušky jsou obvykle dlouhodobé experimenty. Velké množství signálů, včetně rušivého signálu ze zatěžovacího zařízení, je během únavových zkoušek detekováno citlivými AE snímači. Proto by se měly využívat různé rastrovací metody k odfiltrování rušivých signálů. Jedna z efektivních metod, určená k potlačení rušivých signálů je taková, při které se využívá tzv. hlídacích snímačů, umístěných na obou koncích měrné části vzorku. Podle časové posloupnosti hlídacích snímačů a snímačů umístněných na vzorku můžeme detekovat signál z okolí a vyřadit jej.

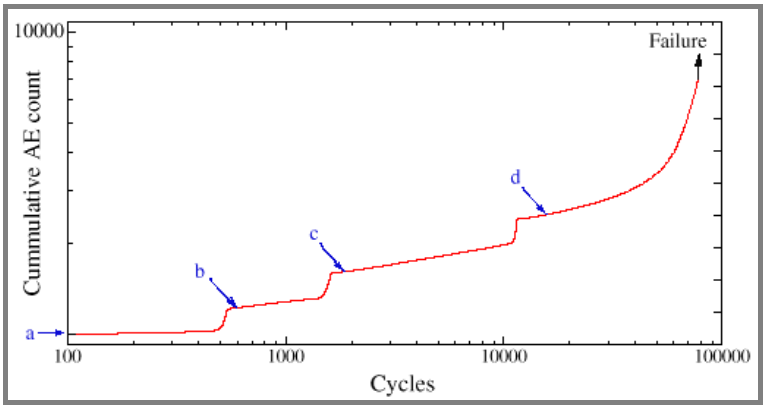
Během únavových zkoušek může být signál AE způsoben různými mechanismy – pohybem dislokací, cyklickým zpevněním, iniciací trhliny, uzavíráním trhlin a nakonec lomem vzorku. Iniciace trhliny byla detekována prvním zachycením signálu AE při nízkých úrovních napětí. Po vyřazení AE signálu, způsobeného otevíráním a uzavíráním trhlin, byl vytvořen graf AE countů v závislosti na počtu zátěžných cyklů se třemi stupni poškození (viz obr. 39).



Obr. 39 Závislost AE countů na počtu cyklů, kde R je asymetrie cyklu

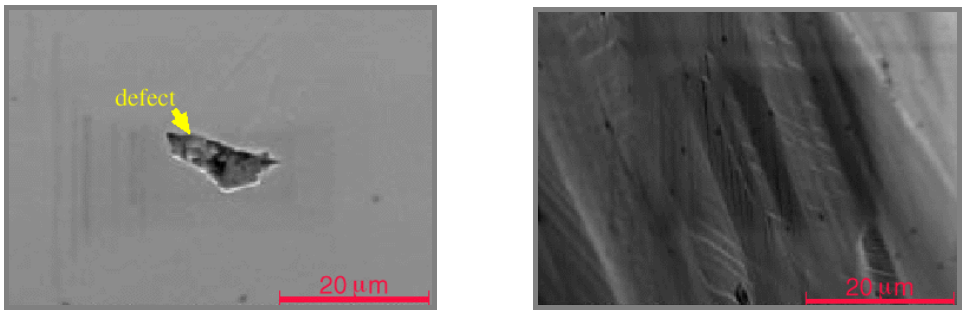
První stádium odpovídá několika prvním cyklům před cyklickou křivkou napětí – deformace. Signál AE se v tomto stádiu šíří na základě pohybu dislokací a cyklického zpevnění nebo změkčení. Druhý stupeň je velmi klidný a můžeme ho definovat jako inkubační dobou trhliny. Zde je pohyb dislokací ustálen a na konci tohoto stádia začnou vznikat první mikrodutiny a mikrotrhliny. Ve třetím stupni dochází k růstu trhlin a k jejich šíření. Spousta signálů AE (ve třetím stádiu) může pocházet z plastické deformace čela trhliny, lomu tvrdých inkluzí (vměstků), spojování mikrotrhlin, transkrystalického štěpení a lomu podél hranic zrn.

Kombinace AE a elektronové mikroskopie může být silným nástrojem při výzkumu únavového chování iniciace trhliny během únavových zkoušek pečlivě leštěných hladkých vzorků. Autoři vyšetřovali povrch leštěných hladkých vzorků pomocí SEM při různých stádiích únavového procesu, kdy byla zpozorována vysoká aktivita AE. Obr. 40 znázorňuje několik skoků na křivce kumulativního počtu překmitů (AE countů) v závislosti na počtu cyklů. Zkouška byla provedena na kobaltové slitině ULTIMET od firmy Haynes International. Maximální napětí bylo 644,8 MPa s asymetrií cyklu R = 0,05. Ke studiu chování iniciace trhliny se zatěžovací frekvence pohybovala na 5 Hz. Po dvou tisících cyklech se frekvence zvýšila na 25 Hz z důvodu urychlení experimentálních zkoušek.



Obr. 40 Aktivita AE hladkého vzorku superslitiny ULTIMET při různých únavových cyklech

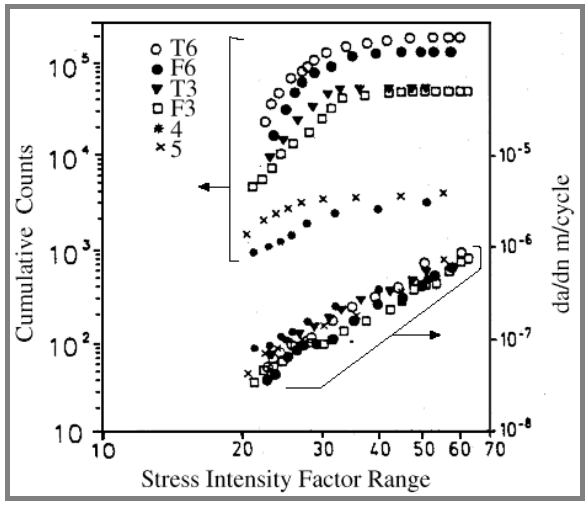
Vzorek byl před únavovou zkouškou elektrolyticky leštěn a zkoumán SEM. Povrch byl dokonale hladký, s výjimkou několika defektů (obr. 41 vlevo). Z důvodu zvýšené emisní aktivity byla přibližně po 600 cyklech zkouška pozastavena a vzorek opět přezkoumán. Stejný postup byl opakován po dvou a šestnácti tisících cyklech (obr. 41 vpravo).



Obr. 41 Mikrosnímek povrchu hladkého vzorku superslitiny ULTIMET před zkouškou (vlevo), při 16 000 cyklech (vpravo)

Bylo zjištěno, že po každém skoku, resp. zvýšení emisní aktivity z obr. 40, kluzné čáry houstly a prohlubovaly se. Nicméně ještě nebylo vyjasněno, jestli se tyto čáry rozvíjejí i v úsecích mezi jednotlivými skoky AE countů. Další výzkum má blíže objasnit či dokonce dokázat, jestli se kluzné čáry rozvíjí jen při zvýšení emisní aktivity nebo rostou neustále během únavové zkoušky. Oblasti blízko povrchových vad byly pečlivě zkoumány, ale žádné změny v chování kluzných čar kolem defektů nebyly nalezeny.

AE byla také aplikována i při výzkumu šíření trhlin během únavových zkoušek. Všechny výsledky z předchozího výzkumu potvrdily, že při zvýšení aktivity AE dochází také ke zvýšení rychlosti růstu trhliny. Je ale nutno podotknout, že se tento jev mění při použití různých materiálů. Výzkumy niklové slitiny INCOLOY 901, hliníkových slitin a ocelí ukázaly, že log-log závislost AE countů a rychlosti růstu trhliny na faktoru intenzity napětí byla lineární. Zato log-log graf AE countů na rychlosti růstu trhliny a faktoru intenzity napětí AISI 316 nerezové oceli byl bilineární (obr. 42). To můžeme vysvětlit tím, že pro mnoho ocelí a hliníkových slitin můžeme Parisovu lineární oblast ve skutečnosti rozdělit na dvě suboblasti, ve kterých jsou mechanismy růstu únavové trhliny odlišné. Při nízkých rychlostech růstu se trhlina nemusí rozrůstat s každým cyklem, a proto se v této oblasti mohou AE county velmi rychle snížit.

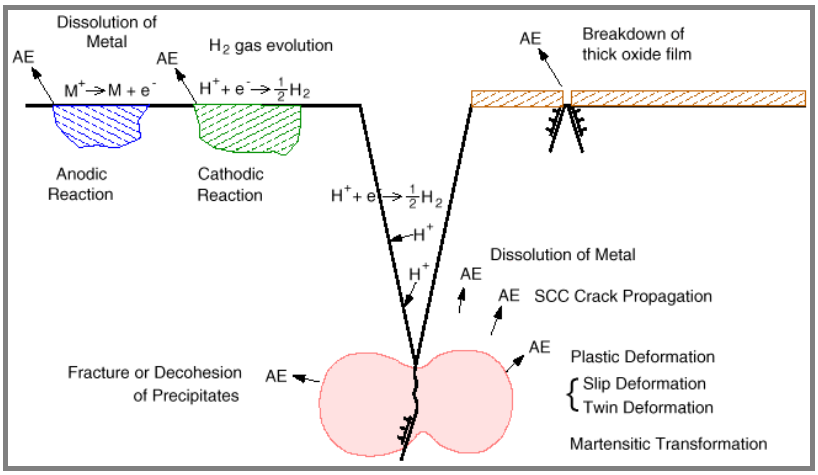


Obr. 42 Závislost AE countů na rychlosti růstu trhliny a faktoru intenzity napětí AISI 316 nerezové oceli (vzorky T6 a F6 jsou žíhány, T3 a F3 jsou stárnuty při 1,023 K po dobu 2h a 4 a 5 jsou stárnuty při stejné teplotě po dobu 8h)

Často jsou konstrukční materiály vystaveny únavovému namáhání za různých podmínek (vzduch, voda, korozivní prostředí). Proto se musí i s těmito vlivy počítat při výzkumu únavové problematiky.

Yuyama [7] zhodnotil základní poznatky AE v oblasti korozivního prostředí. Jeho výzkum se zabýval aplikací metody AE k detekci a monitorování aktivní koroze, koroze pod napětím, vodíkové křehkosti, korozní únavy a mezikrystalové koroze pod napětím u hliníku, hliníkových slitin, hořčíkových slitin, ocelí, nerezových ocelí a jiných (měď a jeho slitiny, titanové a zirkonové slitiny). Mezi pravděpodobné zdroje signálu AE patří iniciace trhliny, vznik a růst koroze pod napětím, vodíková

křehkost, rozklad kovu, vodíkové vylučování plynu, fázová transformace a další. Mechanismy eventuelních zdrojů AE jsou zobrazeny na obr. 43.



Obr. 43 Schéma potenciálních zdrojů AE během koroze, koroze pod napětím (SCC) a procesů korozní únavy [7]

Závěr

Nejdůležitější přínos techniky AE v průmyslu je asi 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 zavčas detekovat nahromaděné mikropoškození uvnitř materiálu a to za provozních podmínek. Na druhou stranu nejzávažnější problém, spojený s interpretací získaných výsledků, je spolehlivost naměřených dat. Mnoho vědců v oblasti měření AE prezentuje své výsledky na základě měření, které obnáší spoustu dat, a tímto způsobem vysvětluje příčiny porušení konkrétních součástí. Přitom ale nevěnují mnoho pozornosti na kvalitu uchycení či kalibraci snímačů. A potom docházejí k závěru, že nenašli žádné rozdíly mezi šumem a reálným signálem AE. Proto bývá někdy velmi obtížné srovnávat své výsledky s ostatními pracemi.

Při srovnávání výsledků měření AE různých materiálů můžeme dojít k závěru, že existuje více publikací týkajících se kompozitů, hornin a keramiky než kovů. Důvodem je nejspíše to, že u těchto materiálů jsou signály AE silnější a významně se měnící než u kovů. Naproti tomu díky homogenitě a jednoduchosti kovů není šíření vln v kovech tak komplikované jako u kompozitů a hornin, protože ve struktuře dochází k menšímu počtu odrazů, difrakcí a rozptylu vln. Proto kovy představují zajímavý materiál pro studii Greenovy funkce a analýzy tvaru vln.

Metodu AE již ve světě využívá stále více výzkumníků v oblasti nedestruktivního testování, a to kvůli jejímu jedinečnému náhledu do procesu poškozování. Hlavní oblasti dalšího úsilí vývojářů a vědců s řešením problémů spjatých s AE se soustřeďují na: snižování šumu, spolehlivost a obtížnost v řešení inverzních úloh šíření vln a analýze tvaru vln.

Vlastní (z)hodnocení a přínos

Část tohoto článku poskytuje ucelené informace z oblasti aplikace AE během únavového poškozování. Dalo by se říci, že autoři věnovali tuto práci lidem, kteří s problematikou AE začínají nebo neví, kterou z metod NDT zvolit při jejich

výzkumu. Konkrétně pro mě byl inspirující v několika oblastech, které bych shrnul do následujících bodů:

- zdroj šíření napěťových vln během únavových zkoušek (pohyb dislokací, cyklické zpevnění, iniciace trhliny, uzavíráním trhlin a nakonec lom zkoušeného vzorku)
- hlavní výhoda využití metody AE: detekuje pouze aktivní změny uvnitř materiálu, zatímco ostatní nedestruktivní metody se pokouší zkoumat „jen“ vnitřní strukturu materiálu a dále jsou to její malé nároky na vybavení a poměrně rychlá instalace a příprava zkoušek
- během cyklického namáhání ve fázi zpevňování materiálu může docházet uvnitř vzorku ke skokům (zvýšení emisní aktivity), což může být způsobeno pohybem kluzných čar, které houstnou a prohlubují se (ještě nebylo vyjasněno, jestli se tyto čáry rozvíjejí i v úsecích mezi jednotlivými skoky AE countů)

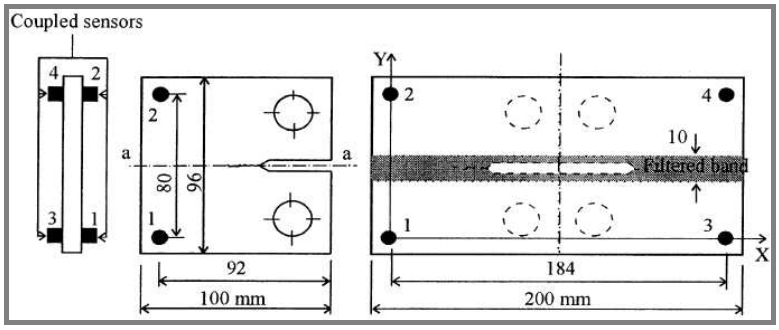
Při našich výzkumech dochází také, zvláště ve stádiu zpevňování, ke zvýšení emisní aktivity. Příčiny tohoto jevu se nám ještě nepodařilo identifikovat, ale díky spolupráci se Západočeskou univerzitou v Plzni se začíná jevit, že toto zvýšení emisní aktivy může být spojeno se změnami v mikrostruktuře materiálu, které se podařily odhalit díky využití další metody NDT - rentgenové spektroskopie.

ROBERTS, T. M., TALEBZADEH, M. Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation. *In: Journal of Constructional Steel Research.* Vol. 59, No. 6, pp. 695-712, 2003. ISSN: 0143-974X.

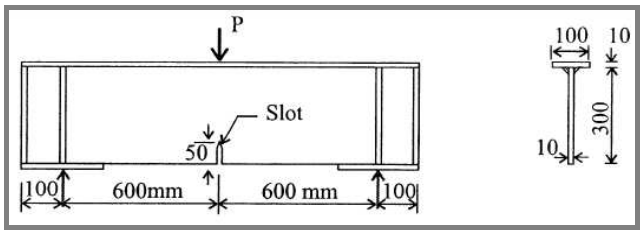
V tomto článku je použitím metody AE s přesnou lokalizací zdroje monitorováno šíření únavové trhliny v ocelích na CT-tělesech a T-nosníku. Zkušební CT-tělesa podléhala zatěžovacímu poměru 0,1, 0,3, 0,5 a 0,7, zatímco vzorky T jen 0,3. Použitím speciálního softwaru se podařilo detekovat události AE jen v úzkém pásmu, které obsahovalo únavovou trhlinu. Výsledky zkoušek naznačují, že počty překmitů (counts) jsou přiměřené v korelaci s rychlostí šíření trhliny (pro rozsah zátěže blízký špičkovému zatížení). Na základě těchto závislostí můžeme predikovat z výsledků krátkodobého monitorování AE zbývající dobu životnosti únavového poškozování materiálu.

Experiment

Pro zkoušky byla použita ocel pro konstrukce S275 JR, ze které byly vyrobeny 2 typy zkušebních těles – CT-těleso a T-nosník (obr. 44, 45). U každého typu bylo ještě v oblasti šíření únavové trhliny několik vzorků svařeno. Podrobné informace vybraných zkušebních těles jsou v tab. 13.



Obr. 44 Geometrie zkušebního CT-tělesa s upevněnými snímači a filtračním pásmem



Obr. 45 Geometrie zkušebního T-nosníku

Tab. 13 Podrobné informace o zkušebních tělesech

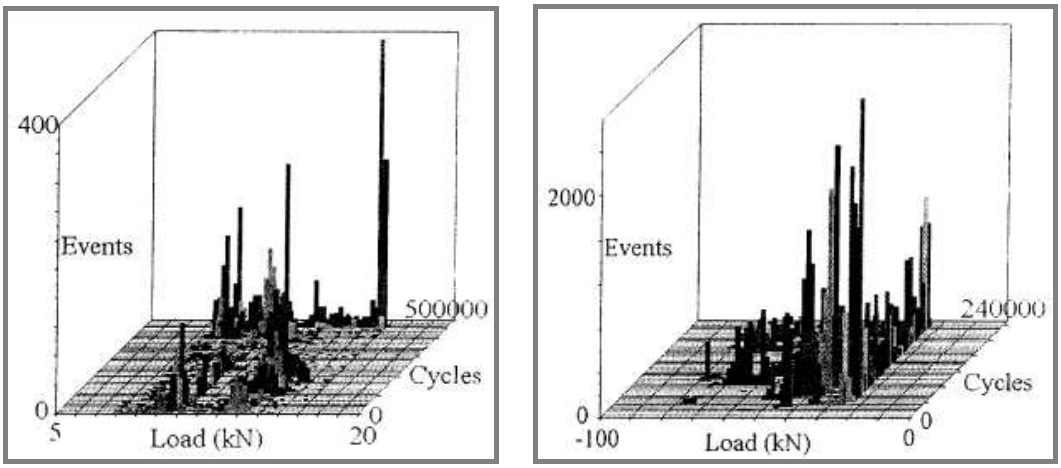
typ vzorku	označení	tloušťka *t*	šířka *W*	rozsah zatížení	napěťový poměr *R*
CT-těleso	CTS1	10 mm	80 mm	1,5 – 15 kN	0,1
	CTS5	6 mm	80 mm	1,0 – 10 kN	0,1
svařované CT-těleso	CTWS1	9 mm	80 mm	1,5 – 15 kN	0,1
	CTWSG1	10 mm	80 mm	5,1 – 17 kN	0,3
T-nosík	SG1	10 mm	375-340	21,0 – 70,0 kN	0,3
	SG2	10 mm	375-340	21,0 – 70,0 kN	0,3
svařovaný T-nosník	WSG1	10 mm	375-340	24,0 – 80,0 kN	0,3
	WSG2	10 mm	375-340	24,0 – 80,0 kN	0,3

CT-vzorky podléhaly cyklickému osovému zatížení tah-tlak. T-nosník byl zatěžován cyklickým tříbodovým ohybem. Všechny únavové zkoušky probíhaly při frekvenci 1 Hz.

Šíření únavové trhliny bylo monitorováno DiSP-4/PCI systémem od firmy Physical Acoustics Ltd. AE byla detekována čtyřmi Nano30 senzory s rezonanční frekvencí 280 kHz. Snímače byly uchyceny na vzorky pružinovou svorkou nebo lepicí páskou s užitím vazebného prostředí. Signály AE byly zesíleny 40 dB 2/4/6 předzesilovačem. Naměřená a zaznamenaná data AE obsahovala hity (emise detekovaná jedním snímačem), události (emise detekovaná všemi čtyřmi snímači), dále county, energie, čas události, doby náběhu, atd. Parametry AE prezentované v tomto článku jsou county a časy událostí. K odstranění signálů AE, souvisejících s povrchovým třením svorky a odraženými vlnami, byl využit speciální software, který filtroval signály pocházející jen z úzkého pásma šířící se únavové trhliny.

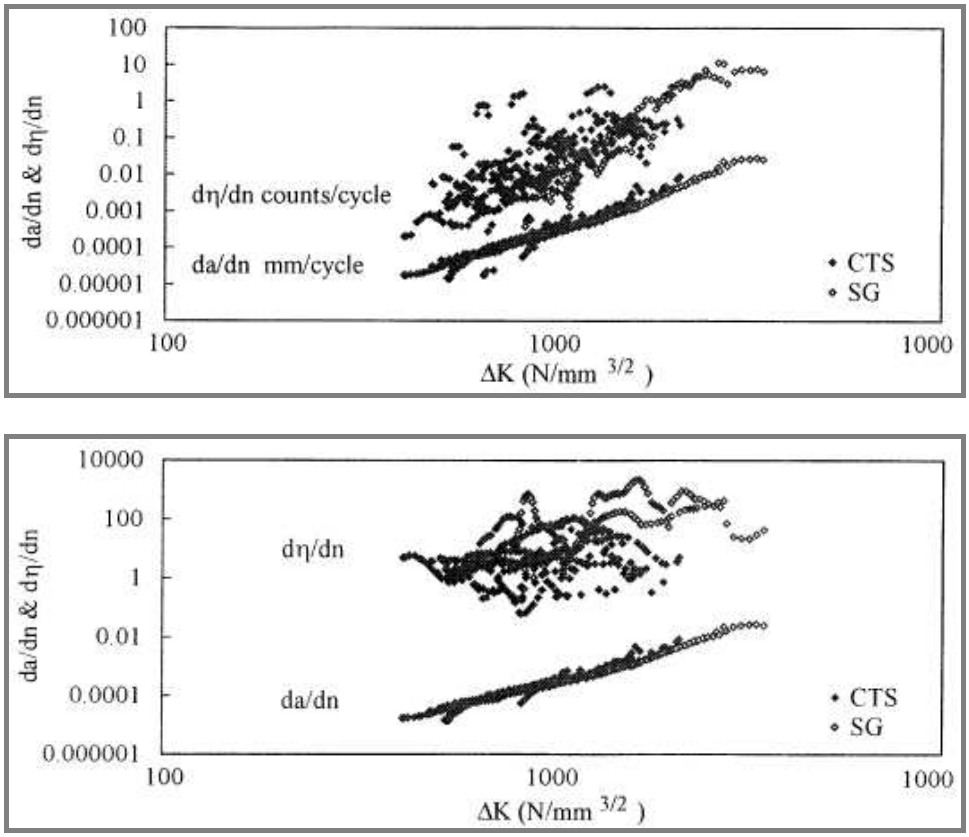
Výsledky

Na obr. 46 jsou zobrazeny záznamy událostí AE (detekované všemi čtyřmi senzory) v závislosti na zatížení a počtech cyklů pro vybraná zkušební tělesa. Zkoušky byly provedeny až do lomu vzorku. Ze záznamů je zřejmé, že události jsou rozloženy místně v celém rozsahu zatížení a cyklů a obecně ukazují nízkou korelaci s rychlostí šíření únavové trhliny, která trvale narůstá s délkou trhliny a počtem cyklů.



Obr. 46 Záznamy událostí AE v závislosti na cyklickém zatížení a počtu cyklů vybraných vzorků, svařované CT-těleso (vlevo), svařovaný T-nosník (vpravo)

K výzkumu korelace mezi šířením trhliny a četností překmitů AE byly vytvořeny grafy, které zobrazují průběhy rychlosti růstu trhliny a četností překmitů AE na faktoru intenzity napětí při různém rozsahu zatížení. Výsledky vybraných typů vzorků jsou znázorněny na obr. 47. Všeobecně pro celý rozsah zatížení je korelace velmi nízká, což zobrazuje graf (v logaritmických souřadnicích) na obr. 47 dole, ale v případě vynesení nejvyšších hodnot zatížení (5 – 10% rozsahu zatížení), je korelace významně lepší (obr. 47 nahoře). Tento podstatný rozptyl výsledků je pravděpodobně zapříčiněn existencí procesů, které vznikají při únavovém zatěžování a které signál AE během zkoušky také zachytí (plastická deformace, uzavírání trhlin, tření povrchů trhliny a další). Z tohoto důvodu bude další výzkum zaměřen na zlepšení zpracování dat a schopnost odfiltrovat signál AE spjatý jen s šířením trhliny.



Obr. 47 Průběhy závislostí rychlosti růstu trhliny a četnosti překmitů AE na faktoru intenzity napětí pro ocelové CT-vzorky a T-nosníky, 5% maxim rozsahu zatížení (nahoře), 100% rozsahu zatížení (dole)

Závěr

Výsledky zkoušek všech typů vzorků naznačují přibližně lineární vztah mezi *log (da/dn)* a *log ΔK*, který může být reprezentován Paris-Erdoganovým vztahem. Experimentální data svařovaných CT vzorků leží zcela nebo částečně v oblasti iniciace trhliny, a proto nebyla zahrnuta v základní statistické analýze.

Využitím softwaru „zdrojové lokalizace“ se podařilo filtrovat data AE jen v úzkém pásmu obsahující únavovou trhlinu. V oblasti nejvyššího zatížení se počet zaznamenaných událostí AE s časem pravidelně zvyšoval, což může mít souvislost s šířením únavové trhliny. Na základě krátkodobého monitorování AE mohou experimentální závislosti mezi četností překmitů AE a rychlostí růstu únavové trhliny naznačovat možnost predikce zbývajícího únavového života materiálu.

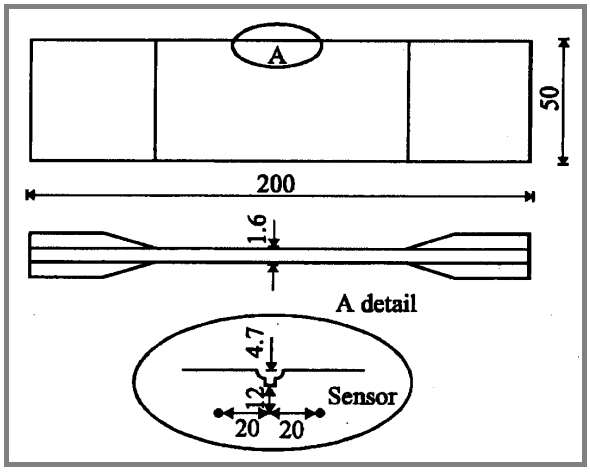
NAM, K., MAL, A. Characteristics of elastic waves generated by crack initiation in aluminum alloys under fatigue loading. *In: Journal of Materials Research.* Vol. 16, No. 6, pp. 1745-1751, 2001. ISSN: 0884-2914.

Tato práce se zabývá výzkumem elastického vlnění v hliníkových slitinách EN-AW-2024/T4 a EN-AW-5052, které vzniká v důsledku iniciace trhliny během statického a únavového namáhání. Hlavním cílem této studie bylo určit rozdíly ve vlastnostech signálů generovaných během statického a únavového namáhání a také vyšetřit, zda by mohly být určeny zdroje vlnění z přechodových a spektrálních charakteristik emisního průběhu signálu. Signály byly zaznamenány širokopásmových snímačem, upevněným na povrchu vzorku a následně vybrány tři výrazné, které byly dále detailně zkoumány. Na základě analýzy průběhu signálu bylo zjištěno, že jednotlivé tvary vln jsou závislé na druhu materiálu, charakteru lomového chování a některé z nich by mohly být přisouzeny plastické deformaci spojené se statickými zkouškami.

Experiment

V následujících experimentech bylo zaznamenáno v reálném čase elastické vlnění, generované během statického a únavového namáhání. Průběh signálu byl zkoumán a hodnocen na základě jeho spektrálních charakteristik. Je nutno podotknout, že signály AE jsou v reálných konstrukcích doprovázeny šumem z okolních zdrojů. Rozlišit rozdíl mezi reálným signálem AE a šumem obvykle bývá velmi důležitým faktorem k získání kvalitních výsledků. Bylo ale zjištěno, že šum, generovaný jinými zdroji, se pohybuje v odlišném frekvenčním rozsahu, než signál generovaný únavovými trhlinami.

Pro experimenty byly využity dvě hliníkové slitiny, EN-AW-2024/T4 a EN-AW-5052. Jejich geometrie je zobrazena na obr. 48. Pomocí elektrojiskrového stroje byly vyrobeny na jedné straně vzorků vruby. K eliminaci šumu byla upínací část vzorku pokryta pryskyřicí a vytvrzena tepelným zpracováním po dobu 20 min. při 80 °C.



Obr. 48 Geometrie zkušebního vzorku v mm

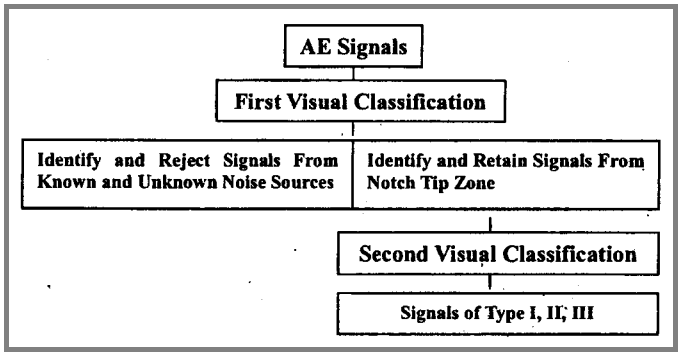
Únavové a statické zkoušky byly provedeny při pokojové teplotě na servohydraulickém zkušebním zařízení INSTRON 8500 za těchto podmínek: $\Delta\sigma = 89$ *MPa,* $R = 0{,}67$ pro slitinu EN-AW-2024 a $\Delta\sigma = 78$ *MPa,* $R = 0{,}5$ pro slitinu EN-AW-5052. Zatěžovací frekvence se pohybovala na hodnotě 2 Hz. Statické zkoušky

proběhly s řízeným posuvem 0,5 mm/min. Pomalá rychlost zatěžování pomohla k redukci šumu od třecích a různých okolních elektrických zdrojů a ke zvýšení citlivosti a zabránění kumulace píků (špiček) v událostech AE.

Měření AE bylo realizováno použitím FWD systému (Fracture wave detektor), který pracuje s rozlišovací schopností 8 bitů a umožňuje digitalizovat průběh signálu v reálném čase. Rychlost digitalizace byla nastavena na 12,5 MHz. Symetricky 20 mm od vrubu (viz obr. 48) byly umístěny dva širokopásmové snímače (DWC B1025) společně s dvěma předzesilovači se zesílením 40 dB a filtrací od 30 kHz do 2 MHz.

Výsledky

Během každé zkoušky, jak je obvyklé u těchto typů analýz, bylo zaznamenáno velké množství signálů, které vznikaly iniciací a růstem trhliny ze špičky vrubu a také vnějšími zdroji - šumem. S blížícím se koncem zkoušky také významně rostl počet zaznamenaných událostí. Jednotlivé signály autoři klasifikovali podle vizuálního posouzení jejich časových a spektrálních charakteristik. Postup je uveden schematicky na obr. 49.

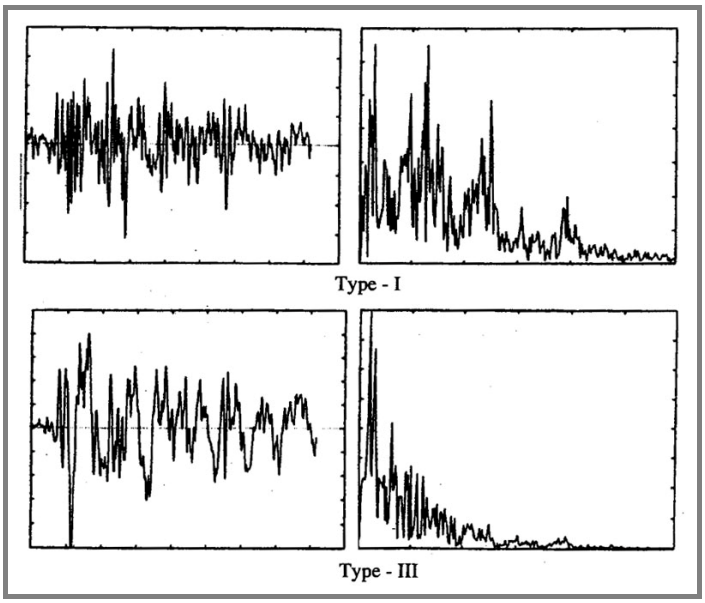


Obr. 49 Vývojové schéma vizuální klasifikace signálů AE

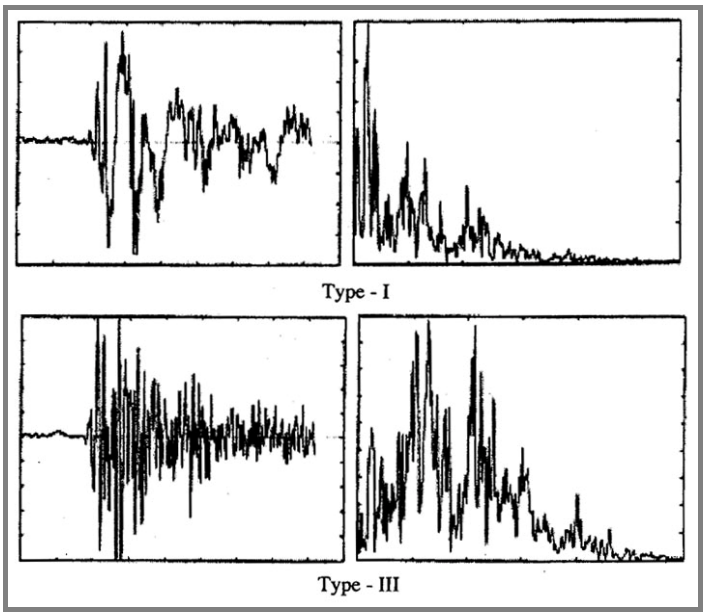
Signály z každého vzorku byly analyzovány a následně rozpoznány tři hlavní typy, založené na jejich spektrálních charakteristikách. Jak můžeme vidět z obr. 50, v signálech typu I jsou u obou materiálů (Al slitina EN-AW-5052 zde není zobrazena) dominantní špičky v jejich výkonových spektrech přibližně 0,25, 0,7 a 1,2 MHz. V signálech typu III mají převládající špičky 0,15 MHz u EN-AW-2024 a 0,4 MHz u EN-AW-5052. Tyto špičky nebo vrcholy ve frekvenčním záznamu jsou především ovlivněny jevy, které předcházejí iniciaci trhliny při statickém zatěžování. Jsou jimi: zeslabení špičky vrubu na vzorku, působení plastické zóny a vznik dutin a jejich slučování.

Příklady klasifikovaných signálů zaznamenaných při únavových zkouškách jsou zobrazeny na obr. 51. Signály typu I mají nižší frekvence (ve výkonovém spektru) s dominantními špičkami přibližně 0,15 MHz a 0,5 MHz. Signály typu II mají vlastnosti podobné deskovému vlnění, obsahující dvě rozlišitelné složky, podélné a ohybové vlny. Jejich spektrum je rozprostřeno v docela širokém rozsahu, pohybujícím se kolem 0,5 MHz. Signál typu III u Al slitiny EN-AW-2024 je charakteristický velmi ostře rostoucí a rozkládající se křivkou s výrazně vysokou složkou frekvence, která naznačuje významné uvolňování energie. Tyto signály mají převládající špičku na hodnotě kolem 0,6 MHz a další těsně za 1 MHz. Jelikož vysoké složky frekvence rychle slábnou, mají relativně krátké trvání. U Al slitiny

EN-AW-5052 se dominantní špičky objevují v případě signálu typu III kolem hodnot 0,4 a 0,75 MHz.



Obr. 50 Ukázka dvou typů časového průběhu signálu AE (vlevo) a jejich spektra (vpravo) detekovaného během statické zkoušky Al slitiny EN-AW-2024 (měřítko: časová osa 1 dílek = 5 µs, frekvence 1 dílek = 0,5 MHz)



Obr. 51 Ukázka dvou typů časového průběhu signálu AE (vlevo) a jejich spektra (vpravo) detekovaného během únavového šíření trhliny Al slitiny EN-AW-2024 (měřítko: časová osa 1 dílek = 5 µs, frekvence 1 dílek = 0,5 MHz)

Rozdílné vlastnosti signálů mohou být přisouzeny skutečnosti, že signály AE jsou přenášeny kombinací podélných vysokofrekvenčních a ohybových

nízkofrekvenčních deskových Lambových vln a relativní počet těchto vln může záviset na blízkosti trhliny od povrchu vzorku.

Většina spektrálních vrcholků v signálech se nachází pod hranicí 1,2 MHz. Vlnění se skládá ze symetrických (S_0) a antisymetrických (A_0) vln nejnižšího módu. Při frekvenci 1 MHz jsou rychlosti vln pro S_0 přibližně υ_{gs} = 4,4 mm/µs a pro A_0 je υ_{ga} = 2,2 mm/µs. Odražené S_0 vlny dorazí do přijímacího snímače asi 4 µs po příchodu přímé S_0 vlny, zatímco přímá A_0 vlna dorazí asi 1 µs po příchodu přímé. Tzn., že jenom první 4 µs zaznamenaného signálu je čistý S_0 mód Lambovy vlny, zbytek je kombinace dalších různých vln. Spektrální obsah signálů není významně ovlivněn četnými odrazy, a proto sledované rozdíly ve spektrálních charakteristikách vln by měly být spolehlivé.

Signály AE, vyplývající z růstu trhliny v okamžiku max. tahového napětí, mohou být způsobeny porušením křehkých inkluzí, nacházející se v cestě trhliny. Proto můžeme konstatovat, že signály získané z únavových zkoušek jsou převážně generovány šířením trhliny. Jelikož je napětí snižováno až k nule, může se stát, že se trhlinka uzavře a signály jsou generovány třením povrchů trhliny. Tyto signály mají frekvenční charakteristiky odlišné od signálů vybuzených růstem trhliny, a tudíž mohou být jednoduše identifikovány a vyřazeny jako šum.

V tab. 14 je zobrazen relativní počet pozorovaných událostí AE z únavových zkoušek dvou hliníkových slitin.

Tab. 14 Klasifikace událostí AE ve vrcholu vrubu získaných z únavových zkoušek

Události AE	**Typ I**	**Typ II**	**Typ III**
% ve slitině EN-AW-2024	21,7	45,7	32,6
% ve slitině EN-AW-5052	12,5	78	9,5

Závěr

Využitím vizuální klasifikační metody byly zkoumány charakteristiky tvarů křivek AE, zaznamenaných během statických a únavových zkoušek na dvou hliníkových slitinách. Signály z obou zkoušek se rozdělily na tři typy podle charakteru tvaru křivky a výkonového spektra. Tyto signály byly na základě podrobné analýzy připsány skluzovému (lavinovému) pohybu dislokací a byly pravděpodobně generovány lomem intermetalických částic a jejich odlupováním z matrice během růstu trhliny. Většina událostí AE, detekovaných během únavových zkoušek, je přisouzena rychlému rozvoji trhliny a přenosu uvolněné deformační energie ve formě deskových vln.

Analýza časového průběhu signálu a jeho výkonového spektra může být v reálném čase využita k monitorování vzniku únavového poškození. Nicméně k dalšímu experimentálnímu a teoretickému modelování bude zapotřebí lépe pochopit problematiku šíření vlnění v materiálech, spojenou se znalostí růstu trhliny a detailního rozboru mikrostruktury.

Vlastní (z)hodnocení a přínos

V tomto článku jsem nastudoval spoustu informací z oblasti šíření elastických napěťových vln, generovaných během statických a únavových zkoušek, které byly detekovány snímači AE. Je důležité si uvědomit, že během samotné zkoušky snímač AE zachytí spoustu signálů, ve kterých je obsaženo vlnění, které pochází z různých zdrojů, např.: odtržení dislokace od překážky, vznik mikrotrhliny nahromaděním

dislokací anebo lom nekovových složek materiálu a další. Signály AE jsou v reálných konstrukcích také doprovázeny šumem z okolních zdrojů. A právě odlišit tento šum od signálů, které nás zajímají, byl hlavní záměr autorů této práce.

Jednotlivé signály AE byly rozděleny na tři hlavní typy, založené na jejich spektrálních charakteristikách. Signály typu I mají ve výkonovém spektru nižší frekvence s dominantními špičkami přibližně 0,15 MHz a 0,5 MHz. Signály typu II mají vlastnosti podobné deskovému vlnění, obsahující podélné a ohybové vlny. Jejich spektrum je rozprostřeno v širokém rozsahu, pohybujícím se kolem 0,5 MHz. Signál typu III je charakteristický ostře rostoucí a rozkládající se křivkou s výrazně vysokou složkou frekvence, která naznačuje významné uvolňování energie. Tyto signály mají převládající špičku na hodnotě kolem 0,6 MHz a další těsně za 1 MHz. Rozdílné vlastnosti signálů mohou být způsobeny kombinací podélných vysokofrekvenčních a ohybových nízkofrekvenčních deskových Lambových vln a relativní počet těchto vln může záviset na blízkosti trhliny od povrchu vzorku.

Většina událostí AE, detekovaných během únavových zkoušek, je přisouzena rychlému rozvoji trhliny a přenosu uvolněné deformační energie ve formě deskových vln.

Poznatky z této práce mohou sloužit k širšímu pochopení jevů, které probíhají v materiálu během únavového a statického zatěžování a objasnit situace, se kterými se setkáváme při měření v našich laboratořích. Např. se to může týkat již delší dobu studovaného problému, a to zvýšení emisní aktivity v procesu zpevňování materiálu. A tak si můžeme klást otázky, je příčinou tohoto zvýšení právě jakýsi „lavinový“ pohyb dislokací nebo lomy intermetalických částic a jejich odlupování anebo je tento efekt přisouzen shluku Lambových vln v tenkém vzorku?

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE

V současné době existuje velké množství literatury, zabývající se hodnocením únavových vlastností konstrukčních materiálů a tedy i Al slitin. Nejnovější publikace se mj. věnují oblastí vlivu svarových spojů, korozního prostředí, modifikace povrchu materiálu (např. svazkem urychlených iontů, atd.) a tepelného zpracování na únavové vlastnosti, ale také pro nás zajímavou oblastí týkající se problematiky směrovosti struktury tvářených Al slitin. Metoda akustické emise je sice v oblasti únavového poškozování využívána, ale spíše ve formě detailního zpracování signálu AE během šíření únavových trhlin, uzavírání krátkých a dlouhých trhlin a další. Měřením a ukládáním parametrů AE během celé doby zatěžování, tzn. od začátku zkoušky až po lom vzorku, se zaměřením na jednotlivé degradační procesy vznikající v neželezných slitinách, je věnována celkem malá pozornost.

Práce [10], zabývající se studiem vysokocyklové únavy hliníkových slitin EN-AW-7075 a EN-AW-6061 (obojí T6) potvrdily, že i po překročení 10^9 cyklů dochází stále k cyklické degradaci vzorku a klesajícímu trendu S-N křivky. Vzhledem k tomu, že se v rámci našich měření zabýváme totožným materiálem (EN-AW-7075/T6) jako autoři článku, bylo provedeno srovnání jejich výsledků vysokocyklové únavy s našimi. Nepatrné rozdíly, které vznikly, je možné přičíst především řádově vyšší frekvenci zatěžování v ultrazvukové oblasti (19,5 kHz), oproti námi použitému zatěžování při frekvenci 144 Hz (pulsátor AMSLER 100 kN), dále vlivu zahřívání vzorku a částečně odlišné geometrii vzorku. Vzhledem k tomu, že se jedná o tvářený materiál, který na základě mnoha našich studií je ovlivněn směrovostí struktury (při protlačování), nemůžeme hovořit o spolehlivém porovnání, protože autoři článku vliv této skutečnosti neuvádějí. Tyto závěry dokazují, že 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 vzorku, stejné tepelné zpracování), ale i stejných podmínek zkoušení (frekvence, typ zatěžovacího cyklu, druh prostředí).

Další studovanou oblastí bylo srovnání průběhů únavových křivek různých materiálů [11]. Vyzdvihl jsem zejména chování materiálů neželezných slitin, jako jsou slitiny hliníku či hořčíku a také pro srovnání chování martenzitické oceli 100Cr6. Na rozdíl od neželezných slitin, tato ocel nevykazuje žádný zlomový bod, jak je zobrazeno např. na obr. 20. U všech případů byl odhalen plynulý pokles únavové pevnosti v oblasti velkého počtu cyklů, a to zřejmě díky poruše mechanismů v mikrostruktuře. Z toho vyplývá, že reálnou „mez únavy“ lze určit tehdy, jestliže se v mikrostruktuře nenacházejí defekty způsobující poškození ani žádné agresivní vlivy ovlivňující stav povrchu součásti.

Velmi přínosné a zajímavé informace pocházely také z práce, která se zabývala vlivem modifikace povrchu materiálu na únavové vlastnosti Al slitin [14]. Autoři přišli k závěru, že po úpravě povrchu Al slitiny EN-AW-7075/T6 MPOS technologií (vytváření iontových svazků pod proudem okrajového plazmatu) došlo k výraznému zlepšení únavových vlastností v korozním prostředí. Při atmosférických podmínkách však neměla tato technologie žádný vliv.

Na základě rešeršní studie, zabývající se vlivem směrovosti struktury vybraných tvářených Al slitin (EN-AW-7055/T7751, EN-AW-7075/T651) na únavové

vlastnosti [8, 9], jsem došel k závěru, že při pokojové teplotě a atmosférických podmínkách nemá směrová heterogenita v případě totožného materiálu podstatný vliv jak na statické, tak i na únavové vlastnosti. Jestli to platí u všech tvářených, vysokopevnostních Al slitin, zatím nelze říci.

Jak již bylo zmíněno výše, metoda akustické emise při únavových zkouškách Al slitin je sice využívána, ale spíše pro detailní studium a vyhodnocování signálů AE, detekovaných při iniciaci a šíření únavových trhlin, uzavírání krátkých a dlouhých trhlin a další. V této práci jsem uvedl jen pár příkladů aplikace metody AE při únavových zkouškách. Autoři se v prvním příkladě pokusili o klasifikaci jednotlivých signálů AE při statickém a únavovém namáhání [17]. Detekované události AE rozdělili podle špiček ve frekvenční oblasti do 3 typů a ty podrobně zkoumaly. Další práce se zabývala monitorováním šíření únavové trhliny v ocelových vzorcích (CT-těleso a T-nosník) [16]. Využitím speciálního softwaru detekovali signál AE jen v úzkém pásu, takže zaznamenané signály pocházeli z blízkého okolí šířící se trhliny. V 3D grafu pak zkoumali trend růstu událostí AE v závislosti na zatížení v tlakové a tahové oblasti.

5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

Na základě rešeršní studie, předchozích zkušeností a potřeb jsme vymezili cíle disertační práce na:

- výzkum únavových vlastností tvářených Al slitin EN-AW-6082/T6 a EN-AW-7075/T6 ovlivněných směrovou anizotropií struktury
- aplikaci NDT metod (AE, rentgenová spektroskopie) jako nástroje k bližší identifikaci strukturních změn během zatěžování v průběhu celého únavového života vzorku

Únavové zkoušky budou většinou probíhat na zkušebním elektrorezonančním pulzátoru RUMUL Cracktronic, pracujícím za podmínek čtyřbodového ohybu a částečně bude využit servohydraulický systém INSTRON a pulsátor AMSLER, kde vzorky budou namáhány osově tah-tlak. Během těchto zkoušek budeme monitorovat průběh zatěžovací frekvence na zkušebním zařízení RUMUL a pro zpřesnění strukturních změn využijeme in-situ metodu AE.

Hlavní přínos a originalita této práce spočívá především ve způsobu cyklického zatěžování. My zatěžujeme vzorky čtyřbodovým ohybem, což je asi nejbližší způsob zatěžování v porovnání s reálnou praxí (např. u provozu letadla, kde jsou křídla namáhána na ohyb a další). Nejčastější způsob zatěžování v řadě laboratoří je však jednoosý tah-tlak.

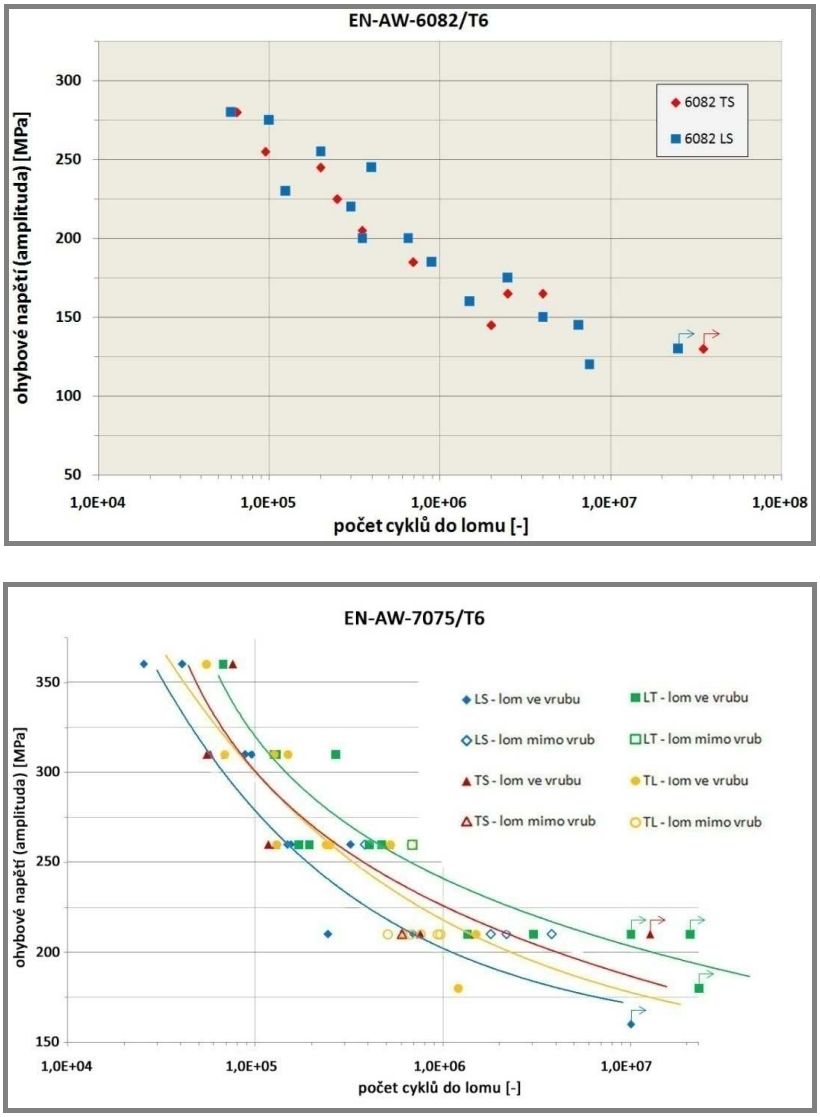
Ve spolupráci s Ústavem materiálových věd a inženýrství můžeme provádět a vyhodnocovat metalografická a fraktografická pozorování experimentálních vzorků. Metodu AE využijeme k bližší identifikaci strukturních změn během zatěžování v průběhu celého života vzorku. Naměřená data z AE pak srovnáme se zatěžovací frekvencí ze zařízení RUMUL a dále se záznamy rentgenových difraktogramů, které budou poskytnuty Západočeskou univerzitou v Plzni, se kterou také spolupracujeme. Na základě těchto experimentálních údajů budeme zkoumat korelaci AE a rentgenové spektroskopie v oblasti stádia kumulace poškození, kterou zatím ještě nikdo nikde nedělal. Ostatní vědecké práce, které se zabývají aplikací metody AE během únavových zkoušek, se však zaměřují jen na určitý proces únavového poškozování.

6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

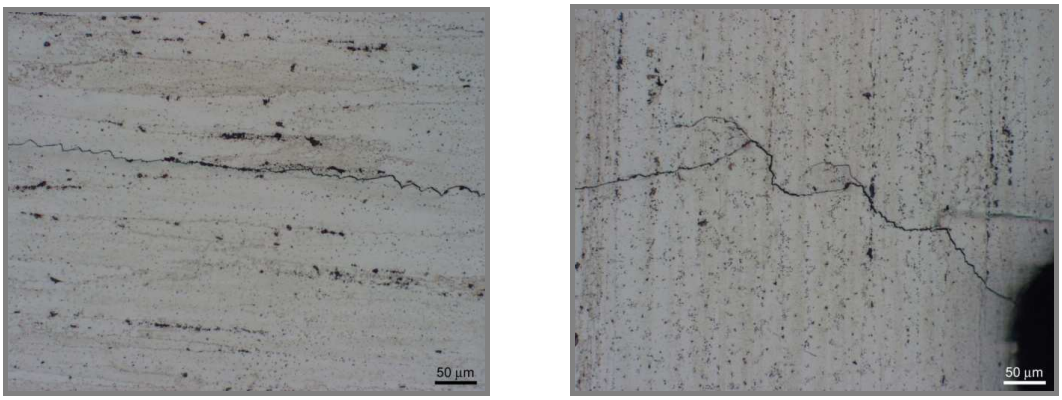
Současný stav řešení disertační práce jsem rozdělil do několika etap:

1. etapa – získání experimentálních dat ze zkoušek cyklických vlastností

V této etapě se již podařilo naměřit a získat základní data ze zkoušek cyklických vlastností obou Al slitin EN-AW-6082/T6 a EN-AW-7075/T6 a dále na základě průběhu zatěžovací frekvence a základních parametrů AE vyhodnotit směrovou anizotropii plochých vzorků. V rámci našeho měření používáme dva typy vzorků – hladké vzorky ploché a kulaté. Ploché vzorky již máme hotové, nyní probíhá měření na kulatých vzorcích. Výsledky S-N závislostí obou slitin jsou na obr. 52 a na obr. 53 jsou ukázky odlišného šíření únavové trhliny v závislosti na směru vláken.



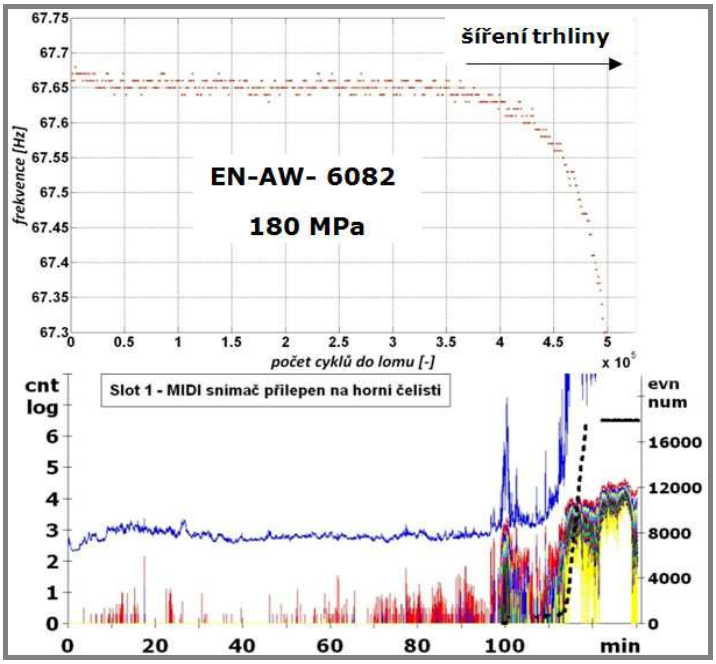
Obr. 52 S-N závislosti Al slitiny EN-AW-6082/T6 (nahoře) a EN-AW-7075/T6 (dole) v jednotlivých směrech

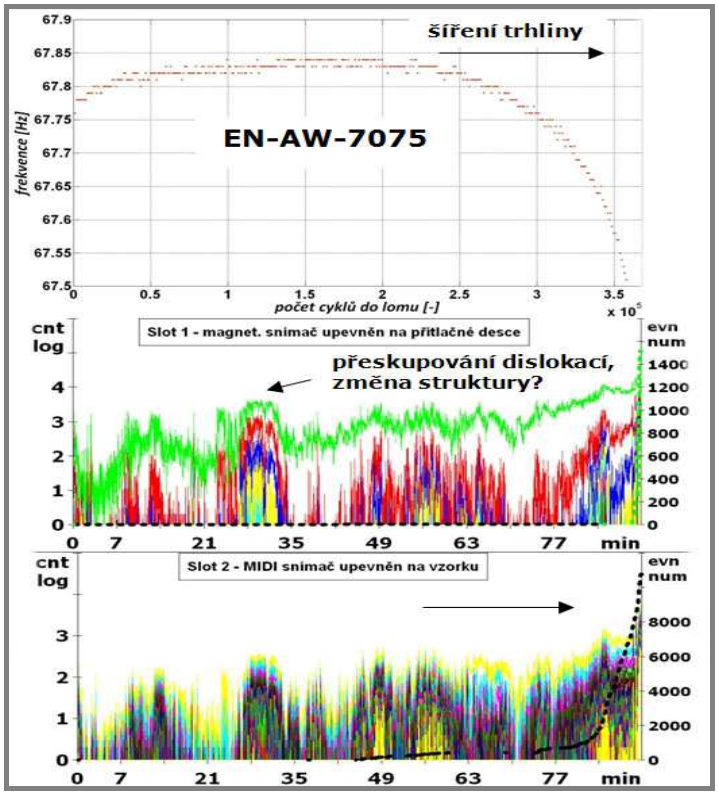


Obr. 53 Odlišné šíření únavové trhliny v závislosti na směru vláken

2. etapa – analýza a srovnání naměřených dat vysokocyklové únavy s metodou AE

Dále byla také během měření vysokocyklové únavy obou slitin zaznamenávána aktivita AE. Následně se průběhy zatěžovací frekvence a AE vyhodnotily a vynesly do grafů, jak je zobrazeno na obr. 54. Snahou bylo vyšetřit projevy únavového poškozování během celé zkoušky, zejména iniciaci a šíření magistrální trhliny. Jak je ze záznamů zřejmé, počátek tvorby prvních mikrotrhlin viditelně odhaluje jak zatěžovací frekvence (jejím zřetelným poklesem), tak i zvýšená aktivita AE. V některých případech dokonce AE zaznamenala iniciaci mikrotrhlin dříve, než došlo k poklesu zatěžovací frekvence.

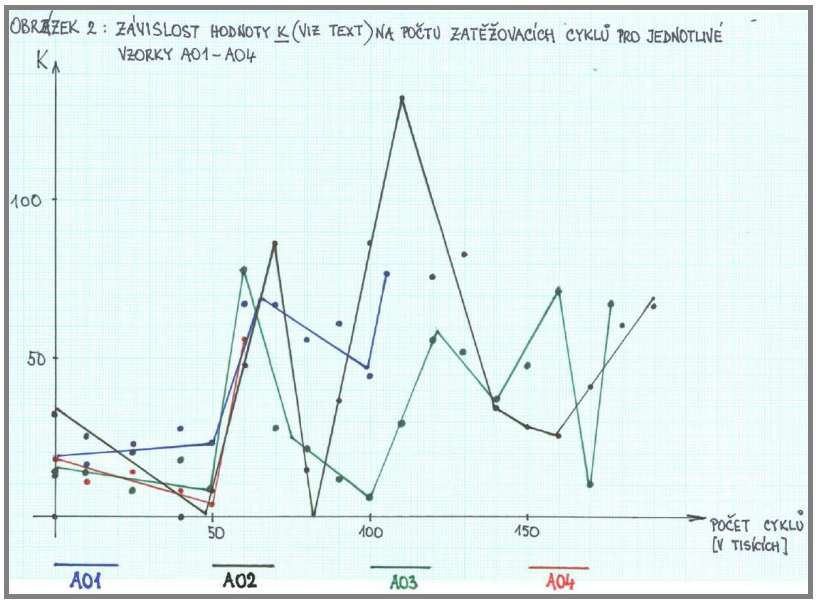




Obr. 54 Průběhy zatěžovací frekvence a akustické emise během cyklických zkoušek, nahoře EN-AW-6082, dole EN-AW-7075

3. etapa - analýza a srovnání naměřených dat AE s dalšími NDT metodami

V další fázi byly zahájeny srovnávací zkoušky metody AE a rentgenové spektroskopie ve spolupráci se Západočeskou univerzitou v Plzni. Očekává se, že budou potvrzeny naše domněnky o tom, že v procesu kumulace poškození dochází ke změnám ve struktuře materiálu, které má možnost rentgenová spektroskopie zaznamenat. Typický projev těchto změn v záznamu AE je na obr. 54 dole, a to kolem 30. minuty zvýšenou emisní aktivitou.

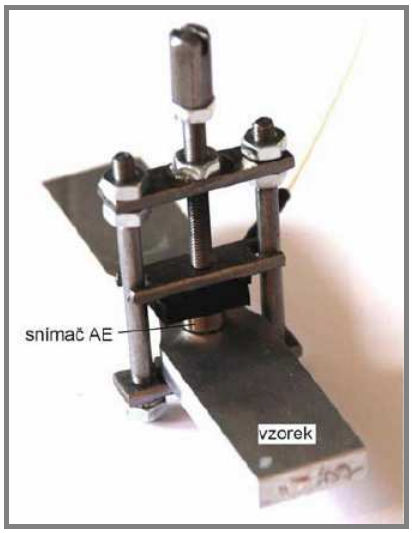


Obr. 55 První výsledky vyhodnocení rentgenových difraktogramů

První výsledky z měření rentgenové spektroskopie jsou na obr. 55. Na ose x je znázorněn počet cyklů do lomu a na ose y faktor K, který charakterizuje míru disorientace bloků mosaikové struktury. V záznamu jsou viditelné výkyvy u všech vzorků, největší kolem 60 a 110 tis. cyklů.

4. etapa – detailní studium parametrů AE

Metoda AE dokáže výběrem vhodných parametrů blíže odhalit procesy, odehrávající se během únavového poškozování a pomůže nám tak více objasnit chování materiálu při cyklických zkouškách. Na vhodném výběru parametrů se právě pracuje. V rámci fondu vědy FSI 2009 se pracuje na novém upínacím systému snímačů AE (obr. 56).



Obr. 56 Upínací přípravek pro snímače AE

5. etapa - konečné stanovení vlivu směrovosti struktury na únavové vlastnosti

Zde bude probíhat finální stanovení vlivu směrové anizotropie struktury na mechanické vlastnosti a zjištění korelace degradačních procesů se signály AE.

6. etapa - studium dalšího zkušebního materiálu

V rámci této práce úzce spolupracujeme s Ekocentrem aplikovaného výzkumu neželezných kovů při VUT v Brně a zde v případě příznivých podmínek je možnost rozšířit zkoumanou oblast o další materiál, konkrétně by se mohlo jednat o slitinu titanu.

7 ZÁVĚR

Na základě rešeršní studie a předchozích zkušeností se stanovily cíle disertační práce. Dílčí výsledky vlastního měření potvrzují, že práce postupuje správným směrem k vyřešení všech stanovených cílů disertační práce. Další postup práce bude spočívat v dokončení mechanických zkoušek kulatých vzorků, studiu metalografických rozborů, analýze a srovnání dat AE s dostupnými NDT metodami (rentgenová spektrografie) a detailním studiu parametrů signálu AE získaných při únavových zkouškách.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1 Křivka únavového života (S-N křivka) 6
Obr. 2 Stádium iniciace únavových trhlin 6
Obr. 3 Principy metody AE a typických NDT metod [1] 7
Obr. 4 Trojrozměrný snímek struktury Al slitiny EN-AW-7055/T7751 10
Obr. 5 Vliv teploty na únavovou životnost Al slitiny EN-AW-7055/T7751 v podélném (vlevo) a příčném směru (vpravo) 11
Obr. 6 Amplituda napětí v závislosti na počtu cyklů do lomu Al slitiny EN-AW-7055 při pokojové teplotě (27 °C, vlevo) a zvýšené teplotě (190 °C, vpravo) 12
Obr. 7 Typy experimentálních vzorků a charakter zatěžování (rozměry v mm) 14
Obr. 8 Stereoskopické snímky mikrostruktury ze tří druhů polotovarů 15
Obr. 9 Křivka smykového napětí v závislosti na smykové deformaci 15
Obr. 10 Průběh amplitudy deformace na počtu cyklů do lomu při jednoosém zatěžování 16
Obr. 11 Průběh amplitudy napětí na počtu cyklů do lomu při jednoosém zatěžování 16
Obr. 12 Průběh amplitudy napětí na počtu cyklů do lomu při různé asymetrii jednoosého zatěžování 16
Obr. 13 Průběh amplitudy smykové deformace v závislosti na únavové životnosti pro čistý krut a krut se statickým osovým napětím 17
Obr. 14 S-N závislosti Al slitin EN-AW-7075 a EN-AW-6061 20
Obr. 15 Lomová plocha Al slitiny EN-AW-6061/T6 20
Obr. 16 Lomová plocha Al slitiny EN-AW-7075 (a) a její mezifázové dutiny (b) 21
Obr. 17 Průběhy závislostí růstu malých a velkých únavových trhlin v Al slitinách, a) EN-AW-6061/T6, b) EN-AW-7075/T6 21
Obr. 18 Tvar vzorku z vysokocyklové únavové tahové zkoušky na ÚMVI FSI VUT v Brně [4] 22
Obr. 19 Celá oblast únavové životnosti Al slitiny EN-AW-7075/T6 [4] 23
Obr. 20 S-N diagram martenzitické oceli 100Cr6 až do 10^{11} cyklů 25
Obr. 21 S-N diagram tvářené hliníkové slitiny AA 6082 až do 10^{9} cyklů 25
Obr. 22 Reálné bezpečnosti při návrhu „meze únavy“ 26
Obr. 23 Geometrie vzorku při zkoušce čtyřbodovým ohybem 28
Obr. 24 Iniciace trhliny z Al_2Cu částice na povrchu EN-AW-2524 Al slitiny 29
Obr. 25 Tvary vzorků Al slitiny EN-AW-6082, (vlevo) hladký, (vpravo) s vrubem, délka vzorku 110 mm, průměr v měrné části 6 mm 31
Obr. 26 S-N diagram Al slitiny EN-AW-6082 32
Obr. 27 Typická lomová plocha hladkého vzorku Al slitiny EN-AW-6082, σ_a = 110 MPa, N = $1{,}6.10^{8}$ cyklů (vlevo), detail místa iniciace trhliny hladkého Al vzorku EN-AW-6082, σ_a = 130 MPa, N = $6{,}6.10^{6}$ cyklů (vpravo) 32
Obr. 28 Šroub M8 a matice z Al slitiny EN-AW-6056 33
Obr. 29 S-N diagram šroubů M8 ze schodovitých zkoušek Al slitiny EN-AW-6056 ($\sigma_a = F_a/A_{d3}$, $A_{d3,nom}$ = 32,8 mm^2) 34
Obr. 30 S-N závislost pro materiál EN-AW-6082/T6 [5] 35
Obr. 31 Základní schéma experimentálního zařízení 36
Obr. 32 Schéma uspořádání únavové zkoušky v režimu čtyřbodového ohybu (*L = 45 mm*, šířka vzorku *b = 4 mm*) 37

Obr. 33 Snímky neozářeného povrchu (a) a ozářeného povrchu (b) slitiny EN-AW-2024 38
Obr. 34 S-N křivky získané ze zkoušek únavy v ohybu Al slitiny 2024/T3 Alclad 38
Obr. 35 S-N křivky Al slitiny EN-AW-7075 získané z únavových zkoušek v ohybu v solné komoře s 2,9% koncentrací vodného roztoku NaCl; ○ ozářené MPOS, ● neozářené vzorky; horní křivka je únava měřená na vzduchu pro oba typy vzorků 39
Obr. 36 S-N křivky Al2024-T3 Alcad slitiny získané z únavových zkoušek v ohybu v solné komoře s 2,9% koncentrací vodného roztoku NaCl; ○ ozářené MPOS, ● neozářené vzorky 40
Obr. 37 Typický příklad časového průběhu signálu AE 43
Obr. 38 Základní schéma měření AE 44
Obr. 39 Závislost AE countů na počtu cyklů, kde R je asymetrie cyklu 44
Obr. 40 Aktivita AE hladkého vzorku superslitiny ULTIMET při různých únavových cyklech 45
Obr. 41 Mikrosnímek povrchu hladkého vzorku superslitiny ULTIMET před zkouškou (vlevo), při 16 000 cyklech (vpravo) 45
Obr. 42 Závislost AE countů na rychlosti růstu trhliny a faktoru intenzity napětí AISI 316 nerezové oceli (vzorky T6 a F6 jsou žíhány, T3 a F3 jsou stárnuty při 1,023 K po dobu 2h a 4 a 5 jsou stárnuty při stejné teplotě po dobu 8h) 46
Obr. 43 Schéma potenciálních zdrojů AE během koroze, koroze pod napětím (SCC) a procesů korozní únavy [7] 47
Obr. 44 Geometrie zkušebního CT-tělesa s upevněnými snímači a filtračním pásmem 49
Obr. 45 Geometrie zkušebního T-nosníku 49
Obr. 46 Záznamy událostí AE v závislosti na cyklickém zatížení a počtu cyklů vybraných vzorků, svařované CT-těleso (vlevo), svařovaný T-nosník (vpravo) 50
Obr. 47 Průběhy závislostí rychlosti růstu trhliny a četnosti překmitů AE na faktoru intenzity napětí pro ocelové CT-vzorky a T-nosníky, 5% maxim rozsahu zatížení (nahoře), 100% rozsahu zatížení (dole) 51
Obr. 48 Geometrie zkušebního vzorku v mm 52
Obr. 49 Vývojové schéma vizuální klasifikace signálů AE 53
Obr. 50 Ukázka dvou typů časového průběhu signálu AE (vlevo) a jejich spektra (vpravo) detekovaného během statické zkoušky Al slitiny EN-AW-2024 (měřítko: časová osa 1 dílek = 5 µs, frekvence 1 dílek = 0,5 MHz) 54
Obr. 51 Ukázka dvou typů časového průběhu signálu AE (vlevo) a jejich spektra (vpravo) detekovaného během únavového šíření trhliny Al slitiny EN-AW-2024 (měřítko: časová osa 1 dílek = 5 µs, frekvence 1 dílek = 0,5 MHz) 54
Obr. 52 S-N závislosti Al slitiny EN-AW-6082/T6 (nahoře) a EN-AW-7075/T6 (dole) v jednotlivých směrech 60
Obr. 53 Odlišné šíření únavové trhliny v závislosti na směru vláken 61
Obr. 54 Průběhy zatěžovací frekvence a akustické emise během cyklických zkoušek, nahoře EN-AW-6082, dole EN-AW-7075 62
Obr. 55 První výsledky vyhodnocení rentgenových difraktogramů 62
Obr. 56 Upínací přípravek pro snímače AE 63

Tab. 1 Chemické složení Al slitiny EN-AW-7055/T7751 10
Tab. 2 Mechanické charakteristiky Al slitiny EN-AW-7055/T7751 11
Tab. 3 Mechanické charakteristiky a chemické složení 19
Tab. 4 Zkoumané materiály a jejich základní mechanické charakteristiky 24
Tab. 5 Doporučené zlomové body, sklony křivek následující po zlomovém bodě a rozptyly 26
Tab. 6 Chemické složení Al slitin AA2524 a AA2024 28
Tab. 7 Chemické složení tvářené Al slitiny EN-AW-6082 (hm. %) 31
Tab. 8 Základní mechanické charakteristiky tvářené Al slitiny EN-AW-6082 31
Tab. 9 Chemické složení tvářené Al slitiny EN-AW-6056 (hm. %) 33
Tab. 10 Základní mechanické charakteristiky šroubů M8 (EN-AW-6056) 33
Tab. 11 Základní mechanické charakteristiky slitin EN-AW-2024/T3 a EN-AW-7075/T6 37
Tab. 12 Mez únavy Al slitiny EN-AW-7075/T6 při 10^7 cyklů a různých provozních podmínkách [v MPa] 39
Tab. 13 Podrobné informace o zkušebních tělesech 49
Tab. 14 Klasifikace událostí AE ve vrcholu vrubu získaných z únavových zk. 55

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] KOPEC, B. a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 1. vydání, 2008. 571 s. ISBN: 978-80-7204-591-4

[2] KUNZ, L. *Experimentální stanovení únavových charakteristík materiálů*, EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2003.

[3] SRIVATSAN, T. S. The fatigue properties and fracture bahaviour of aluminium alloy 7050-T7651. *In: Mater Design*. 2002.

[4] ZAPLETAL, J., VĚCHET, S., KOHOUT, J., LIŠKUTÍN, P. Únavová životnost slitiny hliníku 7075 v rozpětí 0,5 až 10^8 cyklů. *In: Inter. Symp. Metody oceny struktury oraz wlasnosci materialow i wyborow, Jarnoltowek, 22. - 24. 10. 2008.* CD edition, PO Opole, Poland.

[5] LIŠKUTÍN, P. - MAZAL, P. Příspěvek k hodnocení únavových vlastností hliníkové slitiny. *In: XX. Miedzynarodowe Sympozjum – Metody oceny struktury oraz wlasnosci materialow i wyrobow. Politechnika Opolska, Ustroň, 2005*, p. 247-252, Nr. 308, Vol. 86, ISSN 1429-6055.

[6] MICHNA, Š., - LUKÁČ, I., - OČENÁŠEK, V., - KOŘENÝ, R., - DRÁPALA, J., - SCHNEIDER, H., - MIŠKUFOVÁ, A. A KOL. Encyklopedie hliníku, Adin s.r.o., Prešov 2005, ISBN 80-89041-88-4.

[7] YUYAMA, S. Fundamental Aspects of Acoustic Emission Applications to the Problems Caused by Corrosion. *In: Corrosion Monitoring in Industrial Plants Using Nondestructive Testing and Electrochemical Methods, ASTM STP 908, eds*. G. C. Moran and P. Labine (Philadelphia, PA: ASTM, 1986), pp. 43–74.

Seznam komentovaných publikací:

[8] SRIVATSAN, T. S., ANAND, S., SRIRAM, S., VASUDEVAN, V. K. The high-cycle fatigue and fracture behavior of aluminum alloy 7055. *In: Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*. Vol. 281, No. 1-2, pp. 292-304, 2000. ISSN: 0921-5093.

[9] TIANWEN, Z., YANYAO, J. Fatigue of 7075-T651 aluminum alloy. *In: International Journal of Fatigue*. Vol. 30, No. 5, pp. 834-849, 2007.

[10] WANG, Q. Y., KAWAGOISHI, N., CHEN, Q. Fatigue and fracture behaviour of structural Al-alloys up to very long life regimes. *In: International Journal of Fatigue.* Vol. 28, No. 11, pp. 1572-1576, 2006.

[11] SONSINO, C. M. Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety. *In: International Journal of Fatigue.* Vol. 29, No. 12, pp. 2246-2258, 2007.

[12] LI, T., CHEN, Z., ZHENG, Z., JIANG, X. P., WANG, Q. Y., ZHAI, T. High cycle fatigue properties of an AA 2524 aluminum alloy in four-point bend. *In: 2nd International Conference on Heterogeneous Material Mechanics, June 3. – 8., 2008, Huangshan, China.*

[13] BERGER, C., PYTTEL, B., TROSSMANN, T. Very high cycle fatigue tests with smooth and notched specimens and screws made of light metal alloys. *In: International Journal of Fatigue.* Vol. 28, No. 11, pp. 1640-1646, 2006.

[14] BYSTRITSKII, V., GARATE, E., EARTHMAN, J., KHARLOV, A., LAVERNIA, E., PENG, X. Fatigue properties of 2024-T3, 7075-T6 aluminum

alloys modified using plasma-enhanced ion beams. *In: Theoretical and Applied Fracture Mechanics.* Vol. 32, No. 1, pp. 47-53, 1999.

[15] HUANG, M., JIANG, L., LIAW, P. K., BROOKS, CH. R., SEELEY, R., KLARSTROM, D. L. Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research. *In: JOM*. Vol. 50, No. 11, November 1998.

[16] ROBERTS, T. M., TALEBZADEH, M. Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation. *In: Journal of Constructional Steel Research.* Vol. 59, No. 6, pp. 695-712, 2003. ISSN: 0143-974X.

[17] NAM, K., MAL, A. Characteristics of elastic waves generated by crack initiation in aluminum alloys under fatigue loading. *In: Journal of Materials Research.* Vol. 16, No. 6, pp. 1745-1751, 2001. ISSN: 0884-2914.