

Hodnocení cyklického poškození slitin na bázi AlMg s využitím metody akustické emise

František VLAŠIC

školitel: doc. Ing. Pavel MAZAL, CSc.

obor: fyzikální a materiálové inženýrství

„Musíš se mnoho učit, abys poznal, že málo víš“

Michel de Montaigne

Tato prezentace je spolufinancována
Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

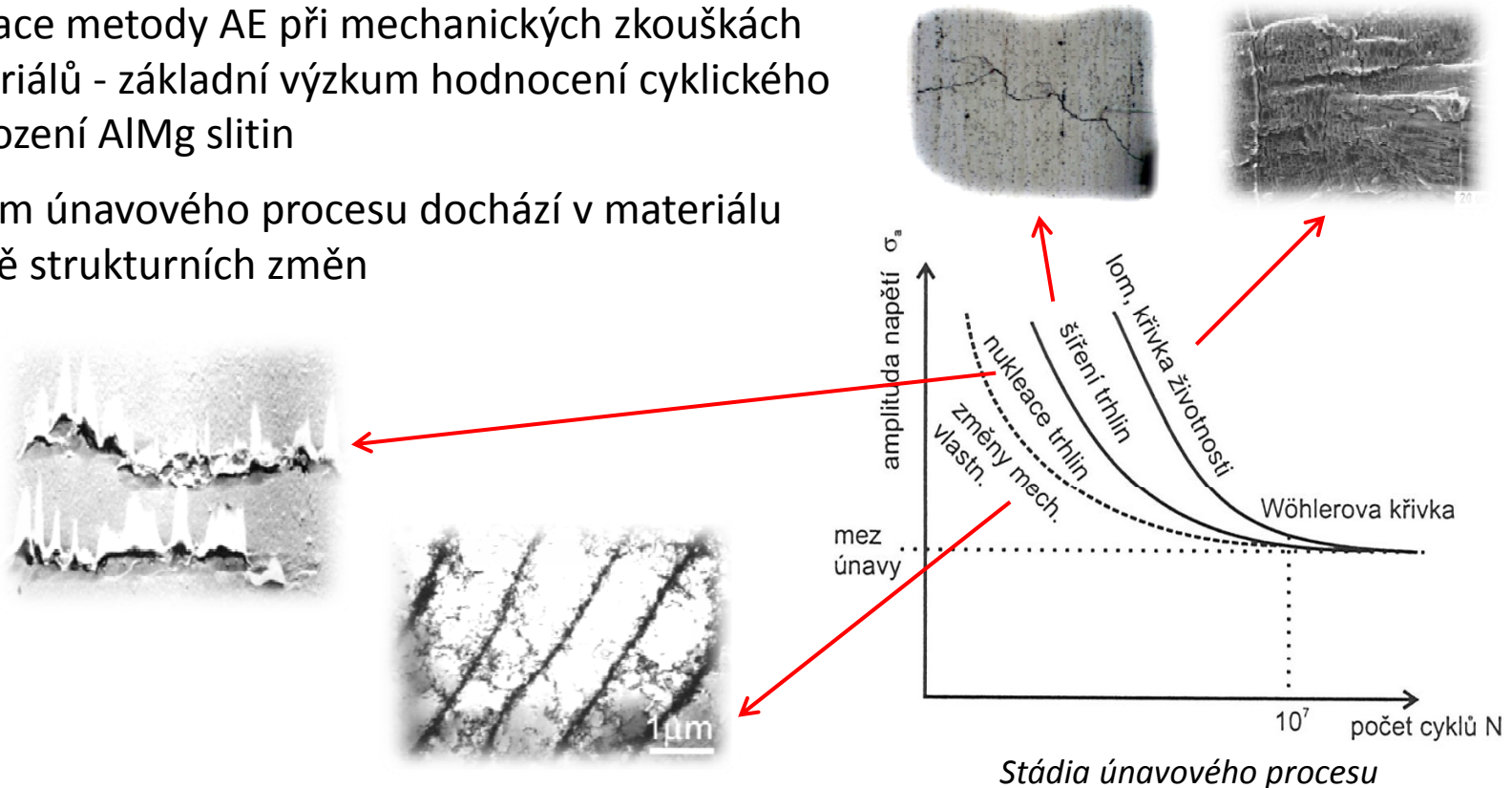
OBSAH

- úvod do problematiky
- shrnutí současného stavu poznání
- vymezení cílů dizertační práce
- výsledky dizertační práce
- závěr



ÚVOD DO PROBLEMATIKY

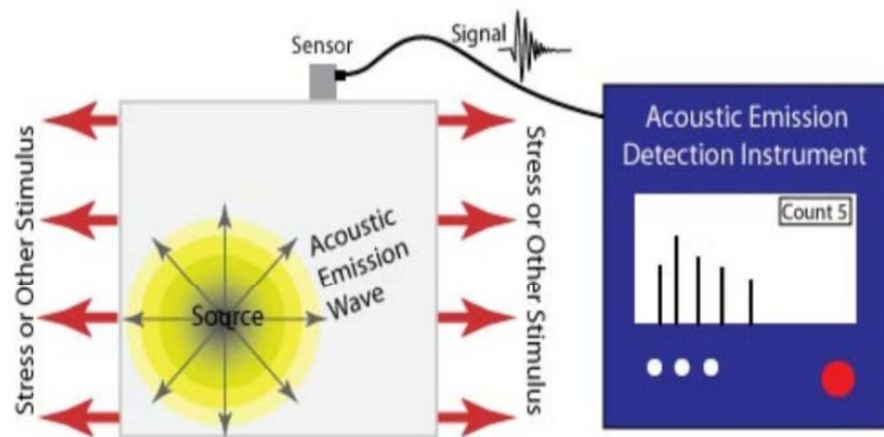
- aplikace metody AE při mechanických zkouškách materiálů - základní výzkum hodnocení cyklického poškození AlMg slitin
- během únavového procesu dochází v materiálu k řadě strukturních změn



ÚVOD DO PROBLEMATIKY

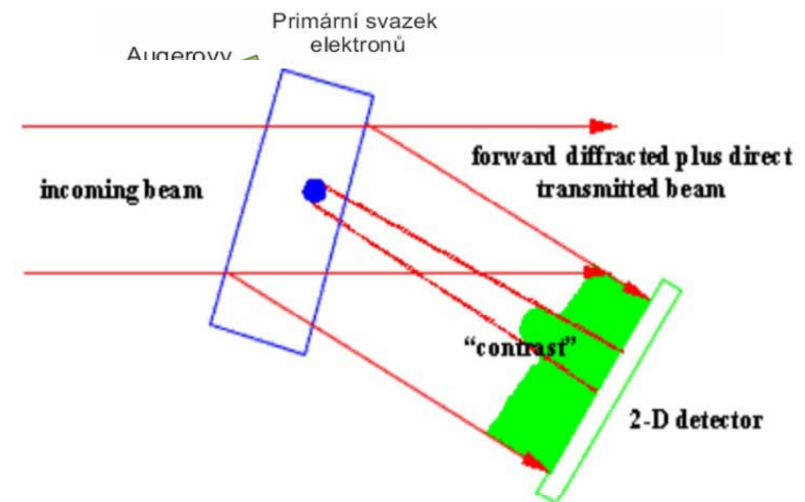
- změny ve struktuře materiálů byly během únavového zatěžování monitorovány:

acoustic emission (AE)



Základní princip metody AE

scanning electron diffraction (XRD) (SEM)



Základní princip XRD

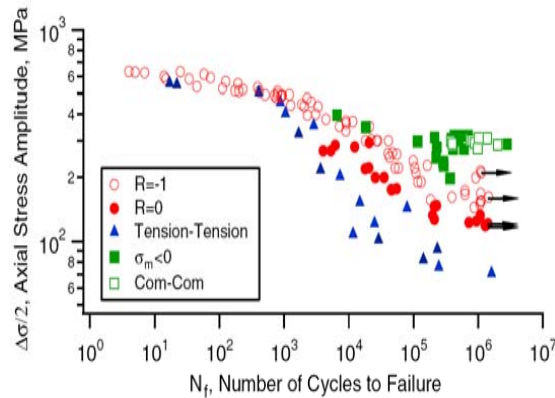
SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

- oblasti výzkumu únavové životnosti neželezných slitin:

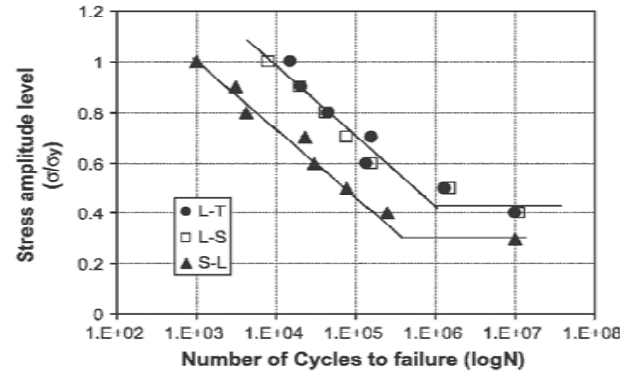
způsob zatěžování

anizotropie tvářených Al slitin

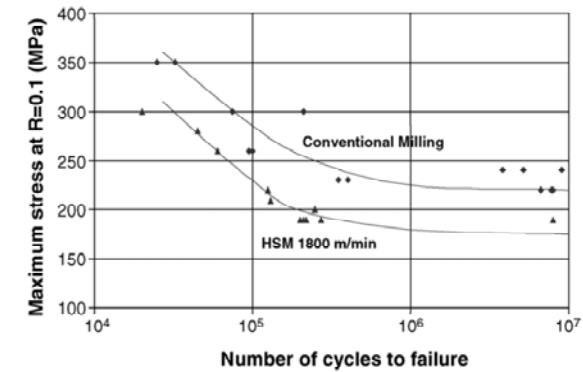
tvár a výroba zkušebních tyčí



[TIANWEN, Z., YANYAO, J., 2007]



[ZHAI, T., 2006]



[WYATT, J. E., BERRY, J. T., 2006]

Tato prezentace byla vytvořena jako součást projektu
"Komplexní systém pro získávání, vzdělávání a trvalé zapojování
talentů do výzkumných a vývojových center AV ČR a FSI VUT v Brně",
reg. č. CZ.1.07/2.3.00/09.0228



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

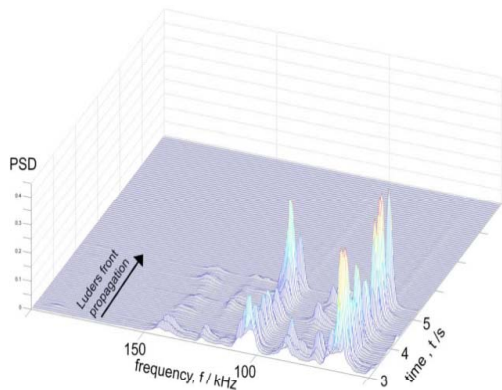


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

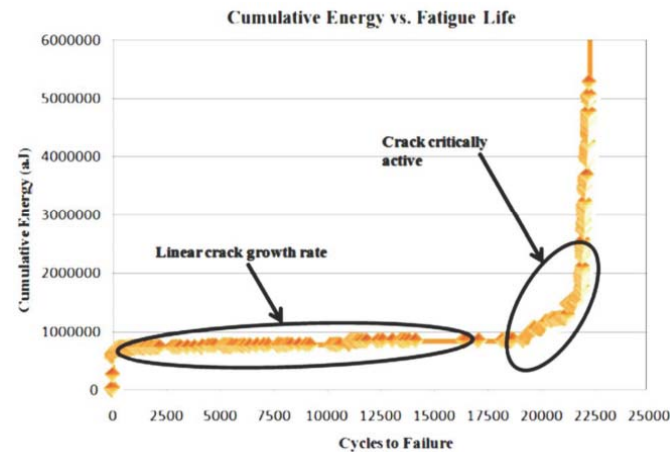
- aplikace metody AE a RTG difrakční topografie během mechanických zkoušek:

statické tahové zkoušky



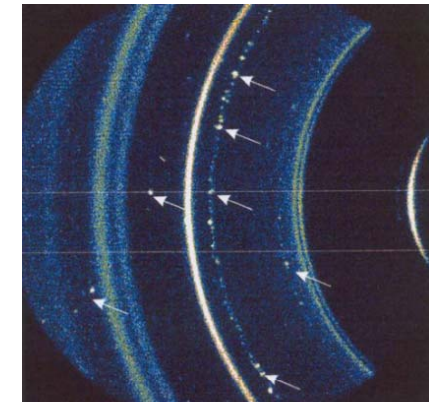
[LAZAREV, A., VINOGRADOV, A., 2009]

únavový proces – identifikace stádií



[BARSOUM, F. F., SULEMAN, J., KORCAK, A., HILL, E. V. K., 2009]

strukturní změny - XRD



[FIALA, J., NEMECEK, S., JANDOVA, D., 2007]

Tato prezentace byla vytvořena jako součást projektu
"Komplexní systém pro získávání, vzdělávání a trvalé zapojování
talentů do výzkumných a vývojových center AV ČR a FSI VUT v Brně",
reg. č. CZ.1.07/2.3.00/09.0228



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



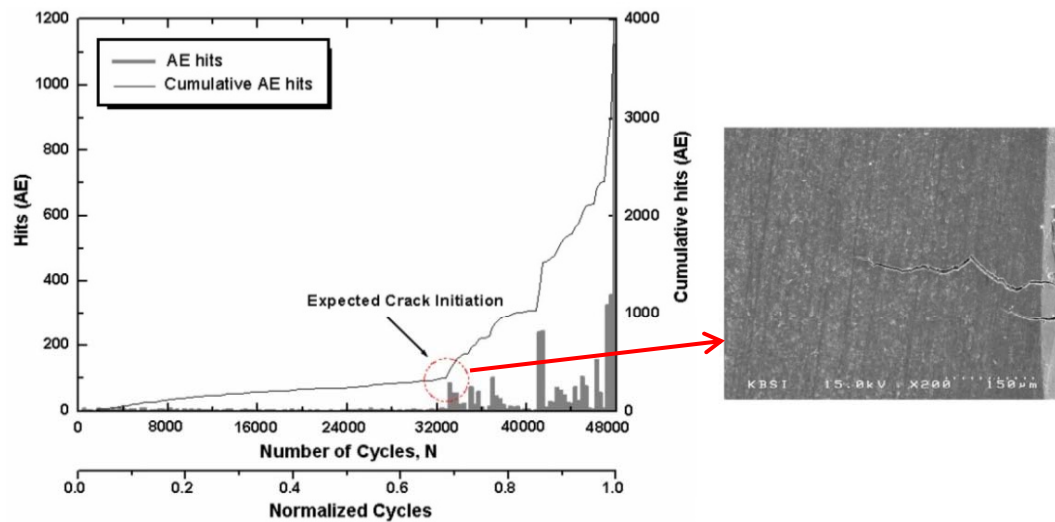
OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost



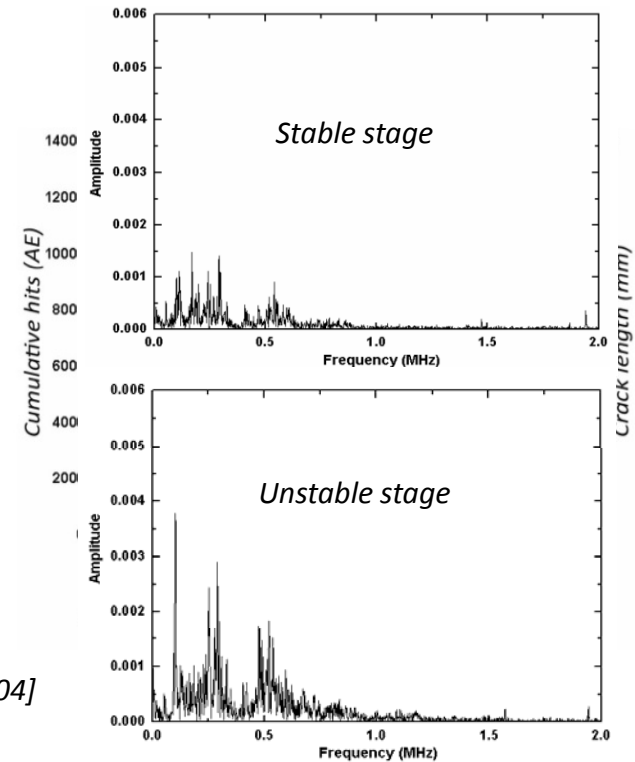
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

- měření signálu AE - včasná detekce a šíření únavové trhliny během cyklického zatěžování Al slitiny AW-2024/T351



[LEE, D. S., LEE, J. H., LEE, M. R., 2004]



Tato prezentace byla vytvořena jako součást projektu
"Komplexní systém pro získávání, vzdělávání a trvalé zapojování
talentů do výzkumných a vývojových center AV ČR a FSI VUT v Brně",
reg. č. CZ.1.07/2.3.00/09.0228



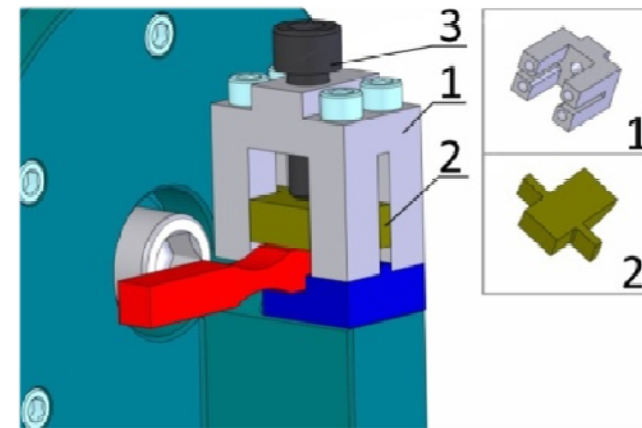
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

VYMEZENÍ CÍLŮ DIZERTAČNÍ PRÁCE

- hlavní cíle:
 - aplikace metod NDT (AE, RTG difrakční topografie) jako nástrojů k bližší identifikaci strukturních změn a vzniku poškození Al slitin v průběhu jejich cyklického zatěžování
- sekundární cíle:
 - výzkum únavových vlastností tvářených Al slitin AW-6082/T6, AW-7075/T6 a AW-2017A/T4 a vliv směrovosti struktury (anizotropie), tvaru zkušebních vzorků a způsobu zatěžování
- předpokládaný přínos:
 - vyvinout metodiku, která by komplexně zhodnotila proces únavového poškozování a obohatila dosavadní vědecké poznání o další přístupy a výsledky

MĚŘICÍ APARATURA

- **únavové zkoušky:** elektrozonanční pulzátor RUMUL Cracktronic (t 8204, č. 180)
- **signál AE:** analyzátor Xedo, IPL (čtyřkanálové), snímače MIDI, MDK-17
- **mikrostruktura:** rastrovací elektronový mikroskop Philips XL-30, difraktometr D8 Discover



Měřicí aparatura Xedo a IPL

Upínací část zařízení RUMUL Cracktronic

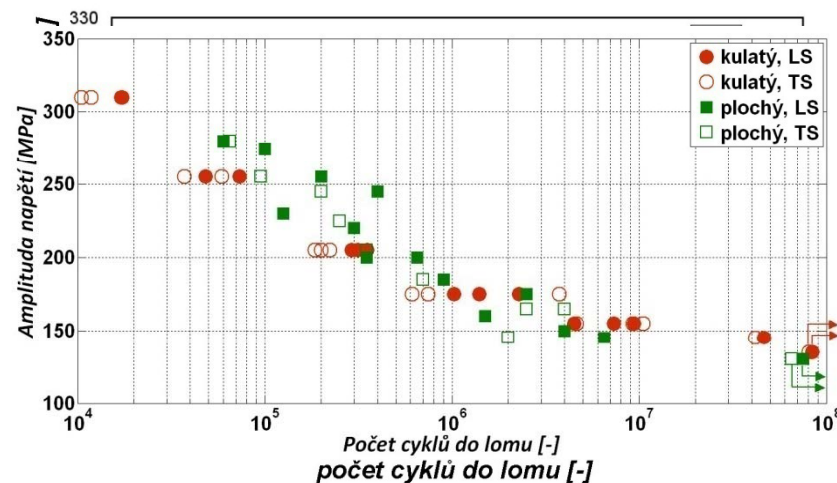
Tato prezentace byla vytvořena jako součást projektu
"Komplexní systém pro získávání, vzdělávání a trvalé zapojování
talentů do výzkumných a vývojových center AV ČR a FSI VUT v Brně",
reg. č. CZ.1.07/2.3.00/09.0228



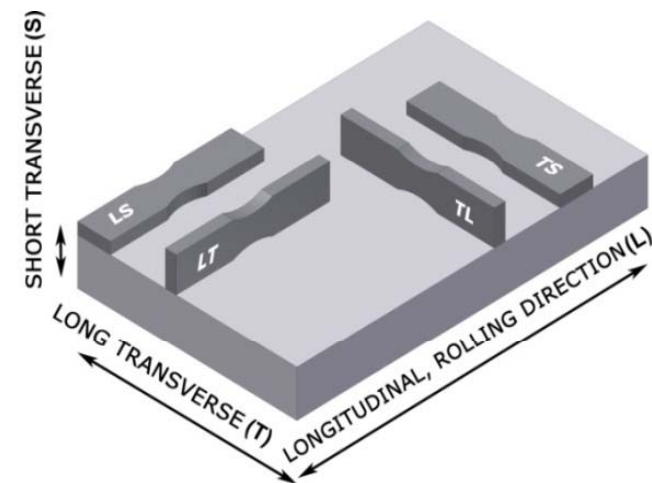
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

VÝSLEDKY – VLIV NEHOMEGENITY STRUKTURY A TVARU VZORKŮ

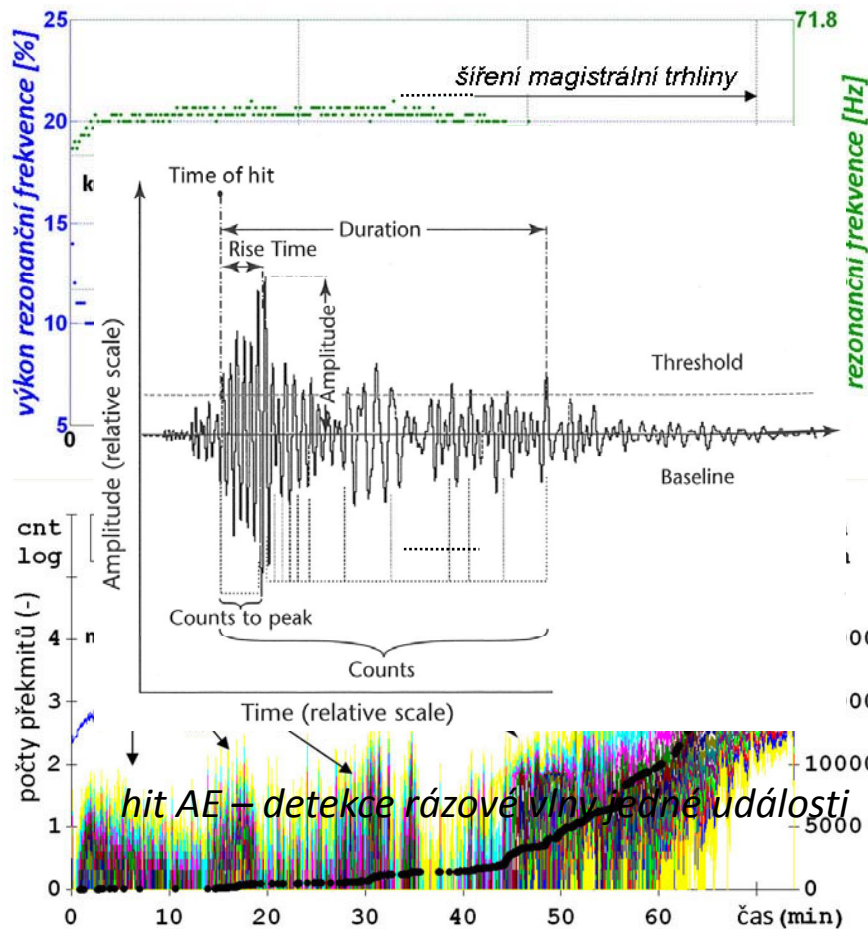
- výsledky únavových zkoušek Al slitin AW-6082 a AW-7075 v oblasti vysokocyklové únavy



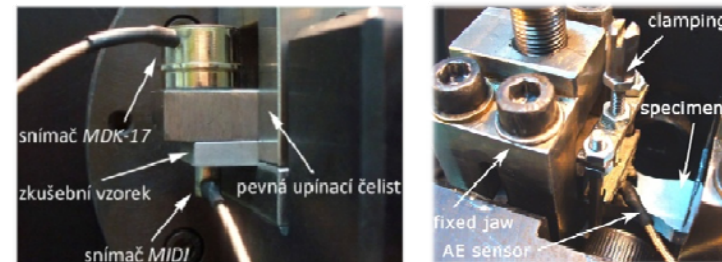
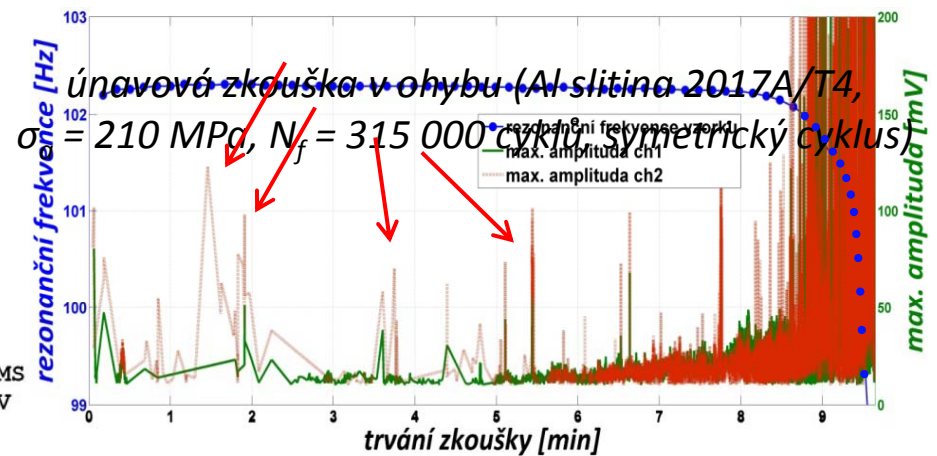
S-N závislost slitiny AW-6082/T6 při ohybovém zatěžení (kruhové ploché vzorky)



Smluvní označování směrů při výrobě zkušebních vzorků pro únavové zkoušky



VÝSLEDKY – MONITOROVÁNÍ ÚNAVOVÉ DEGRADACE METODOU AE

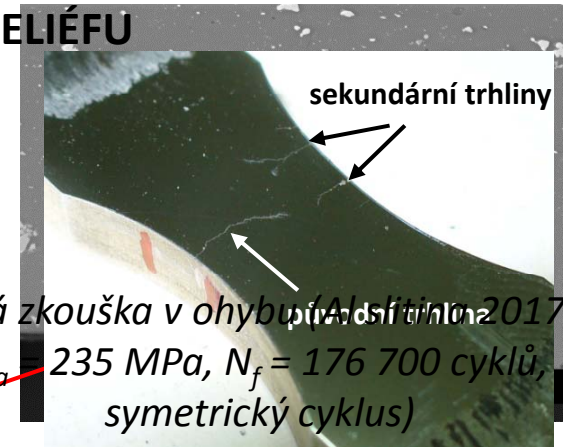
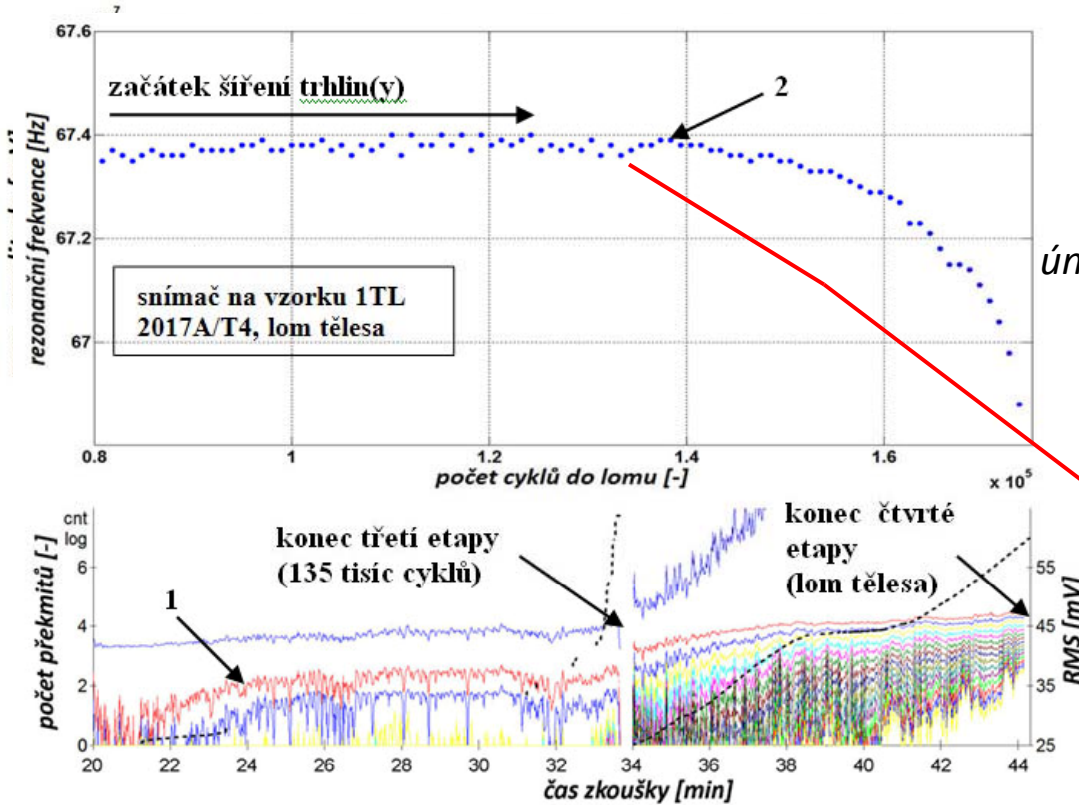


Tato prezentace byla vytvořena jako součást projektu
"Komplexní systém pro získávání, vzdělávání a trvalé zapojování
talentů do výzkumných a vývojových center AV ČR a FSI VUT v Brně",
reg. č. CZ.1.07/2.3.00/09.0228

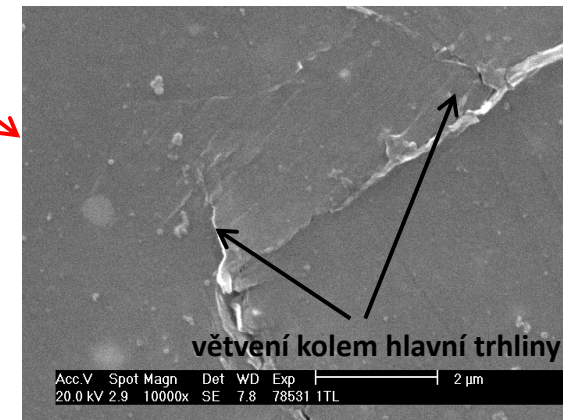


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

VÝSLEDKY - MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA POVRCHOVÉHO RELIÉFU



únavová zkouška v ohybu (Al slitina 2017A/T4,
 $\sigma_a = 235 \text{ MPa}$, $N_f = 176\,700$ cyklů,
symetrický cyklus)

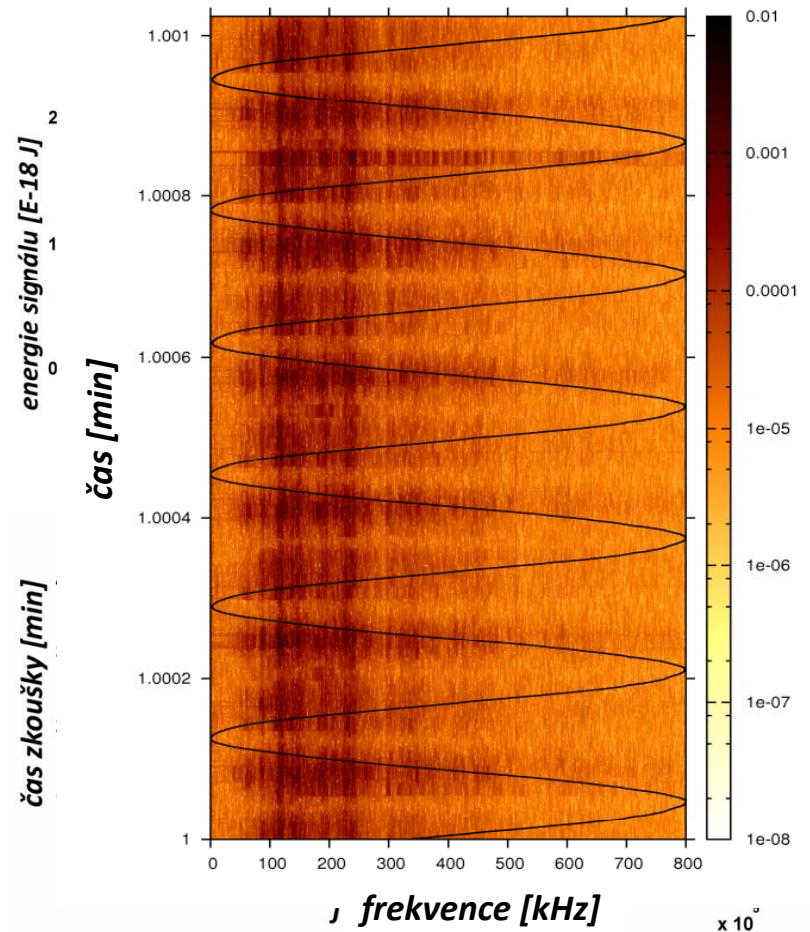
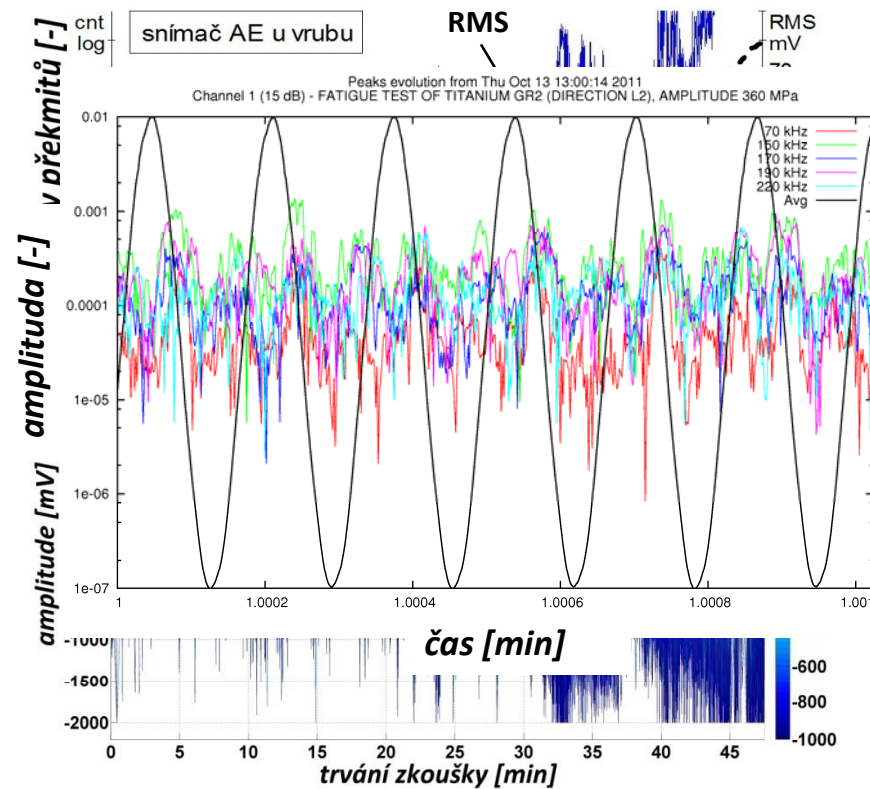


Tato prezentace byla vytvořena jako součást projektu
"Komplexní systém pro získávání, vzdělávání a trvalé zapojování
talentů do výzkumných a vývojových center AV ČR a FSI VUT v Brně",
reg. č. CZ.1.07/2.3.00/09.0228



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

VÝSLEDKY – SIGNÁL AE



Tato prezentace byla vytvořena jako součást projektu
"Komplexní systém pro získávání, vzdělávání a trvalé zapojování
talentů do výzkumných a vývojových center AV ČR a FSI VUT v Brně",
reg. č. CZ.1.07/2.3.00/09.0228



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

VÝSLEDKY – RENTGENOGRAFICKÉ ZKOUMÁNÍ POVRCHU

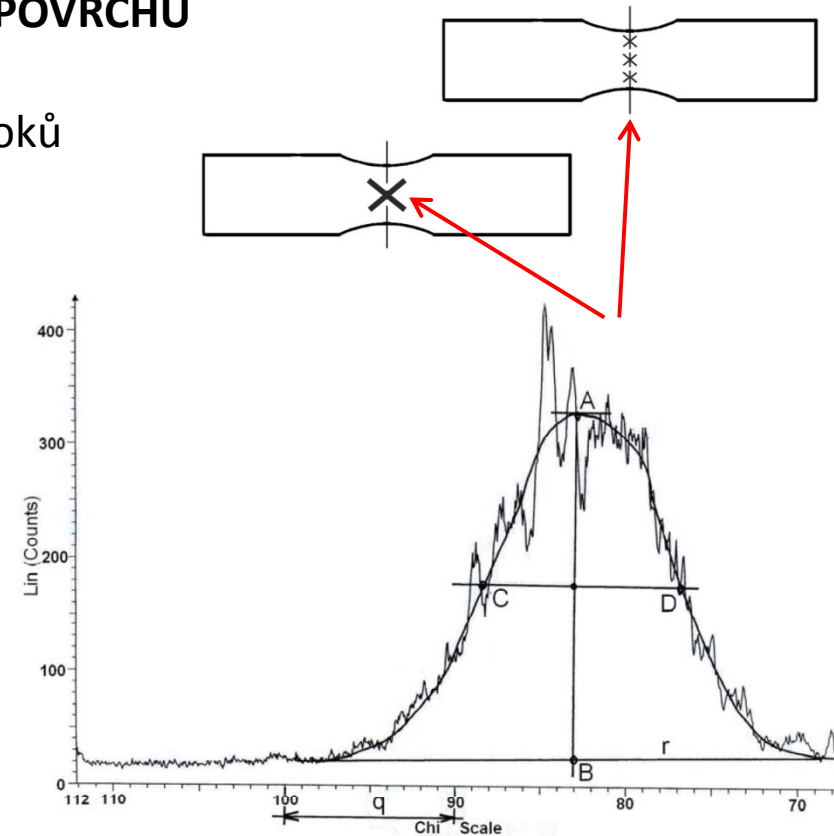
- měření směrové distribuce mosaikových bloků při cyklickém namáhání Al vzorků (povrch)

$$K = 100 \cdot \frac{p}{q} - K_{\min}$$

p... délka horizontální úsečky CD

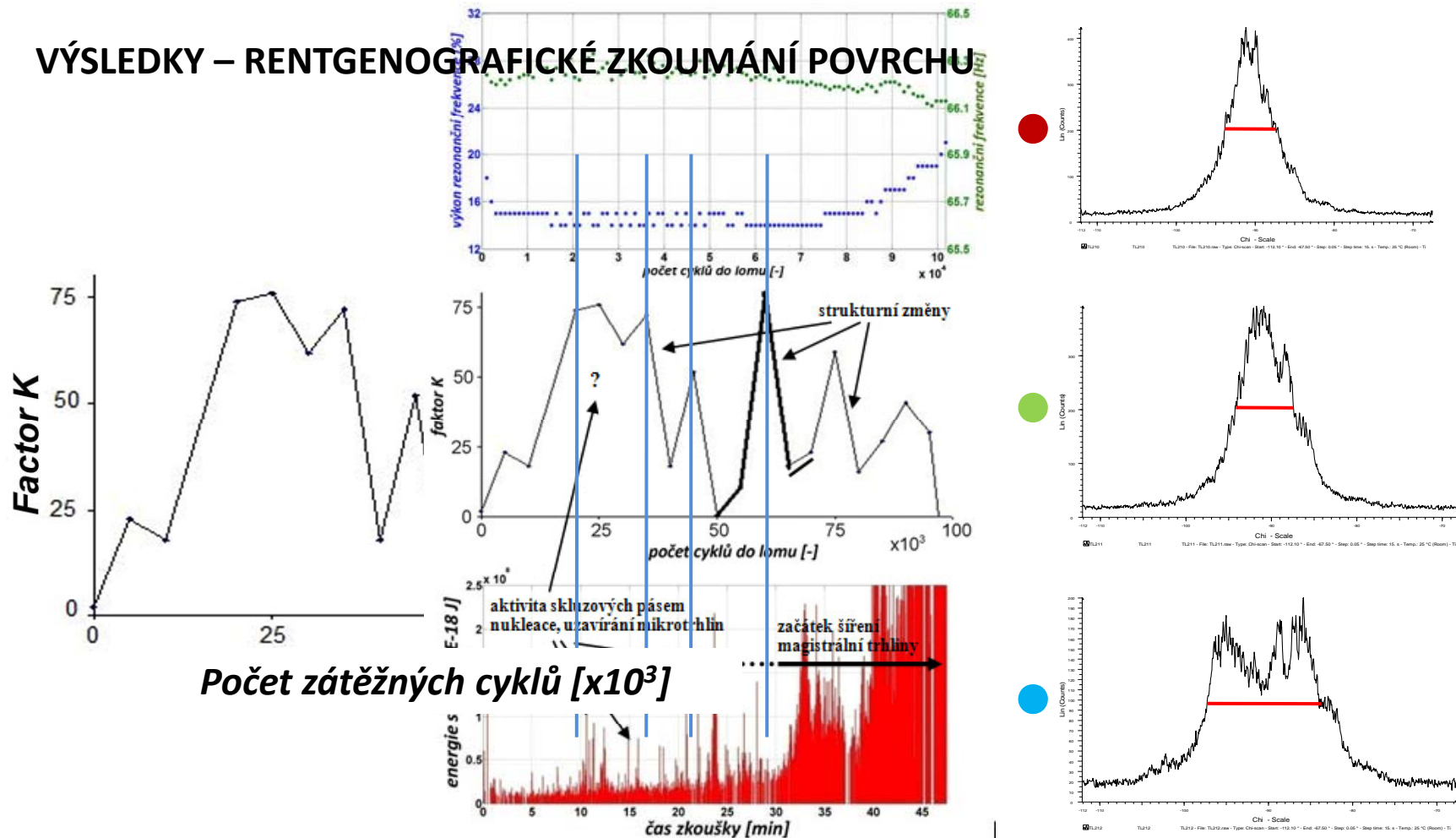
q... odlehlost bodů „-100“ and „-90“ (směr)

K_{\min} ... nejmenší hodnota veličiny $100 \cdot \frac{p}{q}$



Konstrukce hodnoty K: definice azimutálního profilu směrové distribuce difraktovaného záření, EN AW-2017/T4

VÝSLEDKY – RENTGENOGRAFICKÉ ZKOUMÁNÍ POVRCHU



Tato prezentace byla vytvořena jako součást projektu
"Komplexní systém pro získávání, vzdělávání a trvalé zapojování
talentů do výzkumných a vývojových center AV ČR a FSI VUT v Brně",
reg. č. CZ.1.07/2.3.00/09.0228



ZÁVĚR

- směrová heterogenita tvářených Al slitin (geometrie příčných průřezů těles)
- změnou geometrie příčného průřezu zkušebních těles Al slitiny 6082/T6 nedošlo při ohybovém zatěžování k významným rozdílům v únavových životnostech
- signál AE upozorňoval ve všech případech na počátek šíření magistrální trhliny dříve, než bylo zřejmé z průběhu (tuhosti) rezonanční frekvence vzorku
- *nejvhodnější parametry AE*: RMS, maximální amplitudy, energie hitů událostí AE
- *periodické strukturní změny, predikce životnosti tělesa* - hlavní poznatky z výzkumu povrchu cyklicky zatěžovaného materiálu rentgenografickým pozorováním
- **hlavní přínos**: metodika komplexního hodnocení únavové degradace materiálů využitím metod NDT -> korelační znaky -> únavové zkoušky bez přerušování

VÝZNAMNÉ PUBLIKACE K DANÉ PROBLEMATICE

- VLASIC, F., MAZAL, P., LISKUTIN, P. Application of Acoustic Emission Method during High Cycle Fatigue of Aluminium Alloy. *Transactions of the VSB - Technical university of Ostrava, Mechanical series*. Vol. 56, No. 2, 2010, pp. 187-196. ISSN 1210-0471.
- VLASIC, F., MAZAL, P., HORT, F. Comparison of Acoustic Emission Signal and X-Ray Diffraction at Initial Stages of Fatigue Damage. *Journal of Acoustic Emission*. 1 January 2010, Vol. 28, pp. 170-178. ISSN 0730-0050.
- LISKUTIN, P., MAZAL, P., VLASIC, F. Slitiny EN AW-6082 a 7075 - srovnání vlivu směrovosti tvářené struktury na únavové charakteristiky. *Transactions of the Universities of Kosice*. Sv. 2009, č. 4, 2009, s. 175-183. ISSN 1335-2334.
- MAZAL, P., LISKUTIN, P., VLASIC, F. Changes of Mechanical Characteristics of Extruded Aluminium Alloys EN AW-6082 and 7075. *Transaction of the VSB-Technical university of Ostrava, Mechanical series*. Vol. 2009, No. 3, 2009, pp. 133-140. ISSN 1210-0471.
- VLASIC, F., MAZAL, P., NOHAL, L., LISKUTIN, P. Acoustic Emission Method and X-Ray Diffraction as Instruments for Evaluation of Material Degradation. In *Metal 2011 - 20th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: Tanger. 2011, p. 123 - 124. ISBN 978-80-87294-22-2.

Děkuji za pozornost!

Tato prezentace byla vytvořena jako součást projektu
"Komplexní systém pro získávání, vzdělávání a trvalé zapojování
talentů do výzkumných a vývojových center AV ČR a FSI VUT v Brně",
reg. č. CZ.1.07/2.3.00/09.0228



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

OTÁZKY OPONENTŮ – prof. Luboš PAZDERA

1. Jak interpretujete jednotky uvedené v grafu na obr. 1.4 (ksi, psi)?

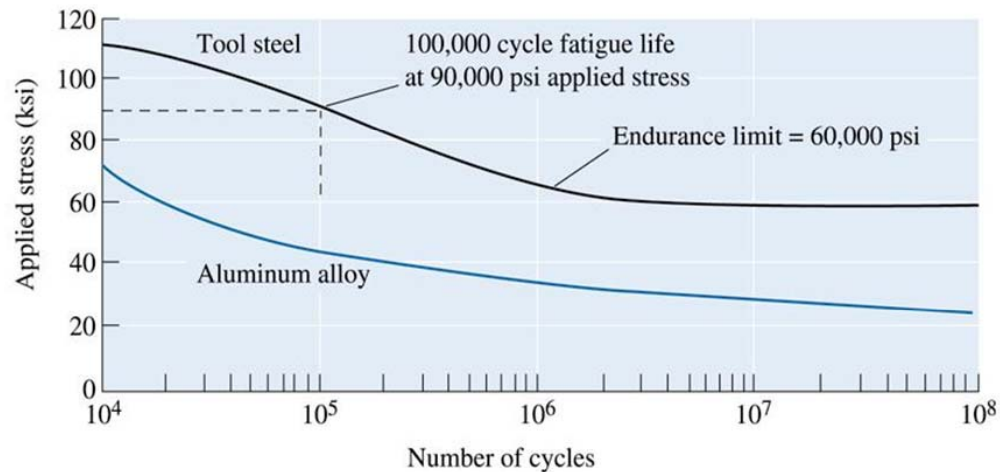
- PSI - anglosaská jednotka tlaku (libra síly na čtvereční palec):

$\text{lb}_f / \text{in}^2$

$1 \text{ psi} = 1 \text{ lb}_f / \text{in}^2 \approx 6\,894,757 \text{ Pa}$

$1 \text{ psi} = 6,894 \times 10^3 \text{ Pa}$

$1 \text{ ksi} = 6,894 \times 10^6 \text{ Pa}$



Tato prezentace byla vytvořena jako součást projektu
"Komplexní systém pro získávání, vzdělávání a trvalé zapojování
talentů do výzkumných a vývojových center AV ČR a FSI VUT v Brně",
reg. č. CZ.1.07/2.3.00/09.0228



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

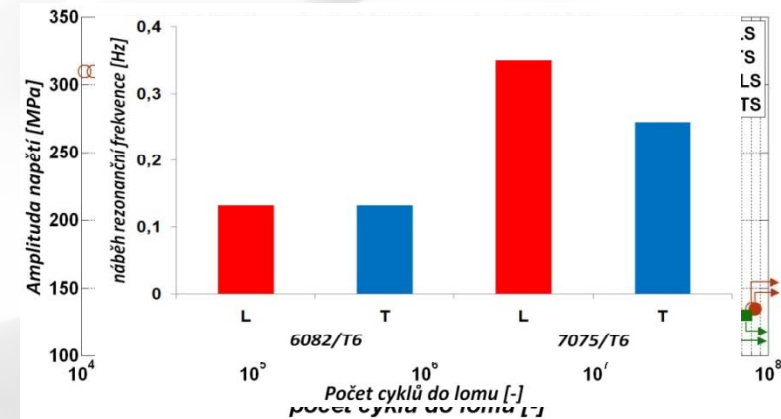
OTÁZKY OPONENTŮ – prof. Luboš PAZDERA

2. Kolik vzorků z jednotlivých typů materiálů bylo sledováno? Jaká byla přesnost (věrohodnost) vyhodnocení výsledků (např. obr. 4. 26)?

- Al slitiny (AW-6082/T6, AW-7075/T6, AW-2017/T4): cca 40 vzorků (všechny směry)
- doporučený počet vzorků pro stanovení únavové křivky a meze únavy: 10 vzorků
- S-N závislosti nebyly prokládány regresními funkcemi – pouze experimentální body (vzhledem k poměrně velkému počtu vzorků)
- výzkumu vlivu směrovosti struktury na náběh rezonanční frekvence vzorku

náběh (Hz)	materiál	$N_f < 10^5$		$10^5 < N_f < 10^6$		$N_f > 10^6$		střední hodnota náběhu
		průřez □	průřez ○	průřez □	průřez ○	průřez □	průřez ○	
2017A/T4	L	-	-	0,08 (2)	-	-	-	0,08
	T	-	-	0,07 (7)	-	-	-	
6082/T6	L	-	0,08 (4)	-	0,1 (3)	-	0,22 (7)	0,13
	T	-	0,06 (4)	-	0,06 (5)	-	0,28 (5)	
7075/T6	L	0,42 (4)	-	0,40 (14)	0,26 (2)	0,34 (7)	0,33 (3)	0,30
	T	0,3 (5)	0,15 (2)	0,32 (20)	0,21 (2)	0,25 (5)	0,33 (2)	

počet cyklů do lomu [-]



Tato prezentace byla vytvořena jako součást projektu
 "Komplexní systém pro získávání, vzdělávání a trvalé zapojování
 talentů do výzkumných a vývojových center AV ČR a FSI VUT v Brně",
 reg. č. CZ.1.07/2.3.00/09.0228

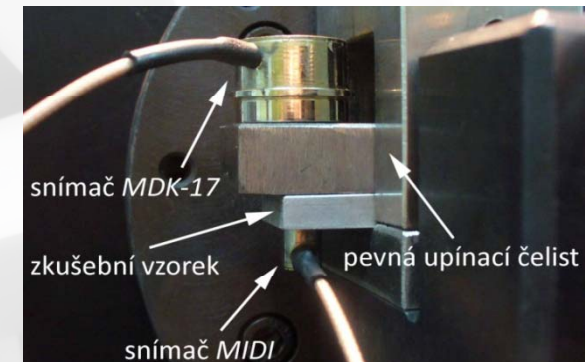
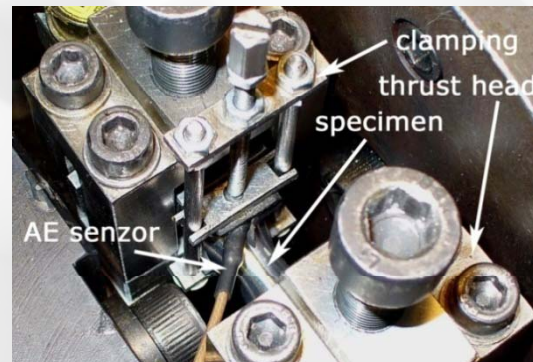
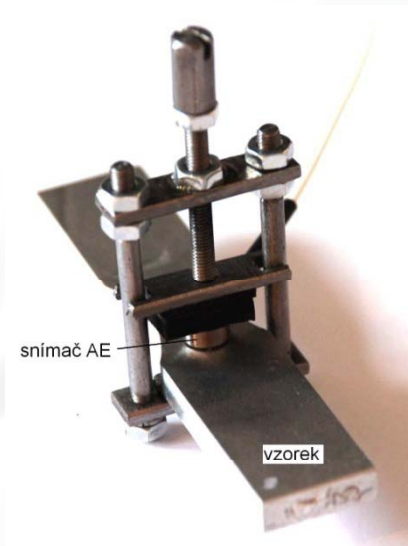


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

OTÁZKY OPONENTŮ – prof. Luboš PAZDERA

3. Mohlo připojení snímače na povrch vzorku (obr. 4.47) ovlivnit zkoušku?

- v případě snímačů MIDI a MDK-17 – žádný vliv na únavovou životnost
- v případě užití mechanického úchytu (v blízkosti mělkého vrubu) pro snímač MIDI – nepatrný vliv na tuhost celé soustavy, pracující s rezonanční frekvencí



Tato prezentace byla vytvořena jako součást projektu
"Komplexní systém pro získávání, vzdělávání a trvalé zapojování
talentů do výzkumných a vývojových center AV ČR a FSI VUT v Brně",
reg. č. CZ.1.07/2.3.00/09.0228

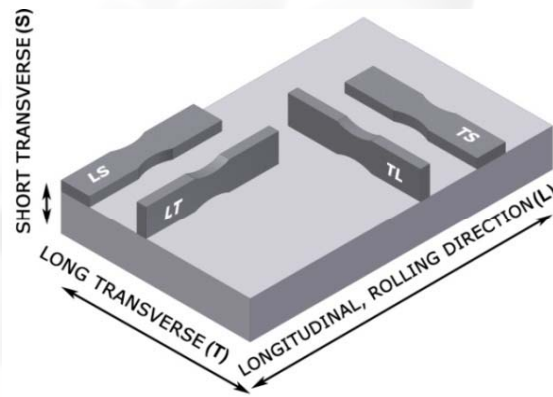


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

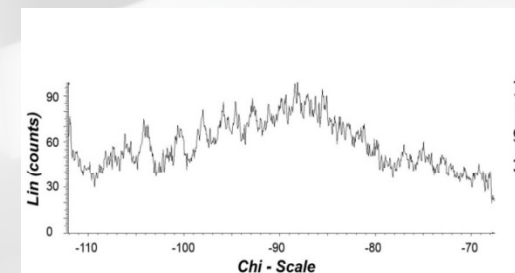
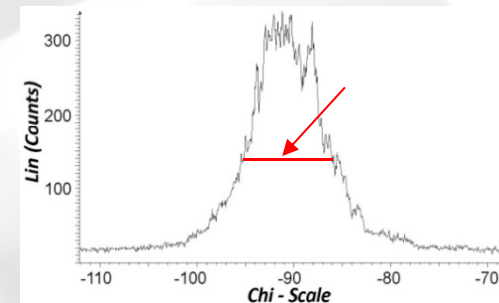
OTÁZKY OPONENTŮ – prof. Luboš PAZDERA

4. Proč jsou pro měření směrové distribuce mozaikových bloků nevhodnější vzorky ze směru TL? Výrobky jsou zatěžovány vždy v tomto směru?

- během rentgenografického zkoumání byly testovány 2 vzorky ve směru LS (ve směru protlačování) a 2 vzorky ve směru TL (příčný směr)
- pro pozorování povrchu tělesa touto technikou by měl sledovaný materiál jevit výraznou texturu a analyzovaný výbrus být vůči této textuře vhodně orientován – to pravděpodobně splňují vzorky TL, jejichž povrch není ovlivněn protlačováním



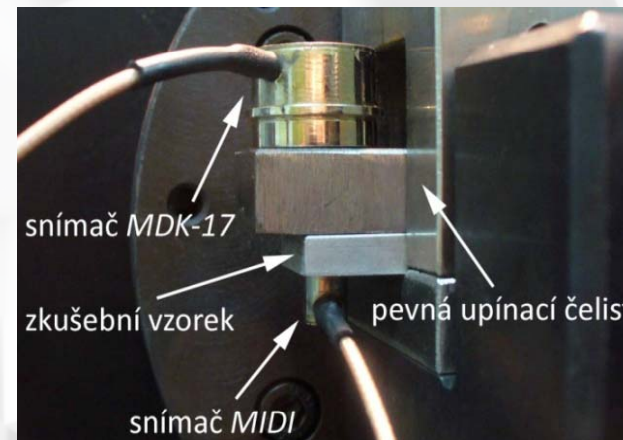
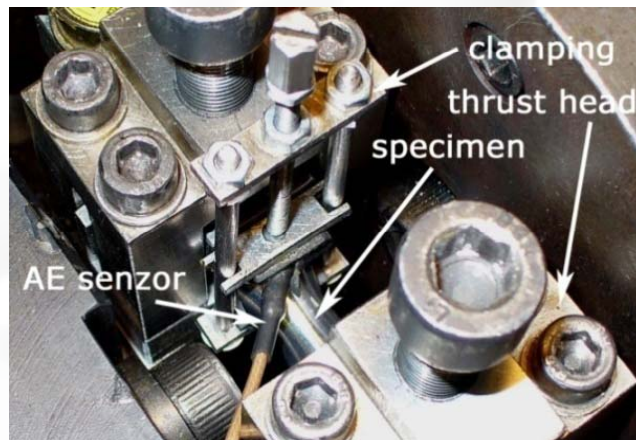
Smluvní označování směrů při výrobě
zkušebních vzorků pro únavové zkoušky



OTÁZKY OPONENTŮ – prof. Luboš PAZDERA

5. Měření metodou AE bylo pravděpodobně prováděno pomocí tří snímačů. Jak bylo prováděno vyhodnocení, resp. korelování jednotlivých snímačů?

- nejměhodnější data lze očekávat z nejbližšího místa zdrojů signálu AE – mělký vrub
- pro komparaci byly dále využity další snímače (jeden umístěný na konci vzorku a druhý na statické upínací čelisti)
- každý snímač má svou vlastní frekvenční charakteristiku a frekvenční složky, na kterých je detekovaný signál nejcitlivější – viz kalibrace snímače



Tato prezentace byla vytvořena jako součást projektu
"Komplexní systém pro získávání, vzdělávání a trvalé zapojování
talentů do výzkumných a vývojových center AV ČR a FSI VUT v Brně",
reg. č. CZ.1.07/2.3.00/09.0228



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

OTÁZKY OPONENTŮ – prof. Jaroslav FIALA

1. Co lze soudit o možnosti monitorovat únavové procesy sledováním elektrochemické aktivity povrchu zatěžovaného strojního dílce?

- tato metoda využívá nenáročné technické vybavení, které se standardně využívá při korozních zkouškách
- **výhody:** 1) využití také v laboratorních podmínkách
2) velká citlivost elektrochemické aktivity na zkoumaný materiál
- **vědecké práce:**

např. E. M. Gutman: Mechanochemie metallov i zaštita ot korosii

- našel cyklické změny struktury ($\Delta a/a$) během cyklování a korelaci cyklických změn elektrodového potenciálu (φ) během cyklování

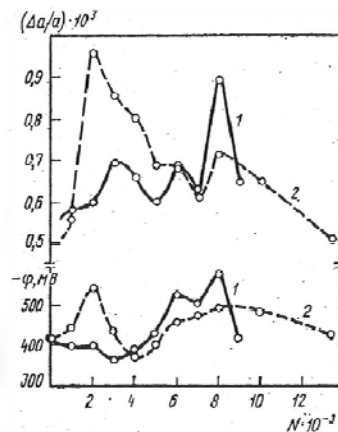


Рис. 111. Изменение микронапряжений кристаллической решетки II рода $\Delta a/a$ и электродного потенциала φ стали 20H2M в связи с усталостью (N — число циклов нагружения):
1 — на воздухе; 2 — в коррозионно-активной среде

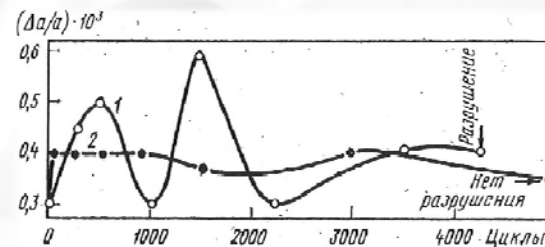


Рис. 113. Изменение микронапряжений кристаллической решетки сталей 20H2M (1) и 08X2Г2М (2) с увеличением числа циклов нагружения

Tato prezentace byla vytvořena jako součást projektu
"Komplexní systém pro získávání, vzdělávání a trvalé zapojování
talentů do výzkumných a vývojových center AV ČR a FSI VUT v Brně",
reg. č. CZ.1.07/2.3.00/09.0228



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

OTÁZKY OPONENTŮ – Ing. Jiří SAMEK, CSc.

1. Jaké významné poznatky přineslo současné užití různých metod diagnostiky popsaných v disertační práci a jejich vzájemná korelace?

- vyhodnocovat výsledky z měření a stanovovat závěry bez předchozích zkušeností a pouze jedním přístupem může být zcestné a nevěrohodné -> zásadní poznatek lze spatřit ve zpřesnění a ověření naměřených dat z metody AE a záznamu tuhosti zatěžovací frekvence dalšími metodami, kterými byly elektronová mikroskopie a rentgenová difrakce
- např. poznatek, že signál AE upozorňoval na začátek šíření magistrální trhliny daleko dříve, než došlo k poklesu tuhosti zatěžované soustavy (využití SEM) nebo k myšlence predikce životnosti cyklicky zatěžovaného vzorku

OTÁZKY OPONENTŮ – Ing. Jiří SAMEK, CSc.

2. Jaké výsledky vaší práce považujete za nejdůležitější pro rozvoj v oblastech materiálové inženýrství a konstrukce strojních dílů?

- poznatek o velké citlivosti metody AE na degradační procesy jak ve stádiu šíření trhlin tak zejména ve stádiu vývoje dislokační struktury a povrchového reliéfu nebo stádiu interakce mezi jednotlivými trhlínami, které byly dále zkoumány rentgenografickou analýzou povrchu vzorku
- nalezeny periodické změny ve struktuře, které mohou vést na predikci zbývající životnosti vzorku (možno také využít měření elektrochemické aktivity)

OTÁZKY OPONENTŮ – Ing. Jiří SAMEK, CSc.

3. Jaké zásadní poznatky a aplikační možnosti pro praxi přináší vaše práce?

- zdroj literární rešerše v oblasti únavového zatěžování Al slitin (výsledky z únavových zkoušek)
- vědecká pracoviště, zabývající se materiálovým inženýrstvím, která mají zájem o monitorování procesů odehrávajících se v materiálu během mechanického zkoušení nebo instituce, které mají zájem např. o monitorování technologických procesů během výroby – obrábění, svařování atd.
- informace o strukturních změnách v materiálu během jeho provozu

OTÁZKY OPONENTŮ – Ing. Jiří SAMEK, CSc.

4. Jakým směrem doporučujete v dané výzkumné oblasti pokračovat, a to z pohledu využití v praxi i přínosu pro rozvoj oboru nedestruktivního testování

- pokračování ve výzkumu rentgenografického zkoumání povrchového reliéfu (3 body)
- detailní výzkum parametrů signálu AE a SEM v případě včasné identifikace trhlin
- monitorování cyklického zpevňování / změkčování při nízkocyklové únavě pomocí signálu AE
- příp. využití metody AE v jiných oblastech
- spolupráce s dalšími institucemi na projektech zaměřených na využití NDT metod v oblasti materiálového inženýrství