České vysoké učení technické v Praze Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Czech Technical University in Prague Fakulty of Nuclear Sciences and Physical Engineering

doc. Ing. Jiří Kunz, CSc.

APLIKOVANÁ FRAKTOLOGIE ÚNAVOVÝCH LOMŮ

APPLIED FRACTOLOGY OF FATIGUE FRACTURES

Summary

Metal fatigue represents a very serious engineering problem of structure components exposed to the time variable loading during their operation service. Complex study of the fatigue process has been emanating especially from the fracture mechanics giving a theoretical base, and fractography which poses a irreplaceable source of detailed objective information on repercussion of material microstructure on the loading. Besides the two mentioned main disciplines, also the others (e.g., fatigue testing, physical metallurgy, computer modelling of failure processes, etc.) have a great contribution to this problem solution. Hybrid branch of science synthesizing all knowledge on fracture processes can be called *fractology* – according to Yokobori's beyond recall term.

The fatigue crack growth is controlled by interaction of many various factors dealing with the loading details, geometry of cracked body, material composition and properties, temperature and other environmental characteristics, etc. Influence of the factors on fatigue crack growth rate is illustrated on examples from engineering practice or laboratory experiments.

By means of fracture mechanics principles and empirical findings, the fatigue crack growth rate can be expressed as an analytical function of some mentioned parameters (e.g., stress range, stress ratio, loading frequency, etc.).

One of the geometrical parameters of cracked body is specimen thickness. Its effect is often given to the coincidence with presence of shear lips on the fracture surface. It was detected that shear lip width is controlled by stress intensity factor range ΔK ; this relation was considered as linear. It was proposed a correction of energy release rate range ΔG taking into account mixed mode and plain stress condition in shear lips fracture area. Correlation between fatigue crack growth rate and this corrected value of ΔG is very good. By synthesis of fracture mechanics and quantitative fractography, the influence of shear lips on the fatigue crack growth rate was explained.

Effect of environment factors is illustrated on the study of fatigue crack growth in austenitic steel at elevated temperature in water medium simulating exploitation conditions of nuclear power plants. In comparison with the corresponding data in air, the macroscopic fatigue crack growth rate in water environment at room temperature is higher because of participation of intergranular separation. In water medium, an elevated temperature inhibits the intergranular decohesion and thus decelerates the fatigue crack growth.

Fractographic aspects of fatigue crack growth in structural alloys are presented; special attention is given to the relation between striation spacing and macroscopic fatigue crack growth. Three examples of fractographic reconstitution of fatigue crack growth history are presented. All these case studies are focused on the full scale fatigue tests of aircraft structure parts.

Fractology based on synthesis of fracture mechanics and quantitative fractography represents a sophistical and effectual method of fatigue process study.

Souhrn

Únava materiálů, ze kterých jsou vyrobeny konstrukční prvky vystavené za provozu časově proměnnému zatěžování, představuje velmi závažný problém inženýrské praxe. Komplexní výzkum tohoto degradačního procesu vychází zejména z teoretických poznatků lomové mechaniky a z výsledků fraktografické analýzy, která je v řadě případů nenahraditelným zdrojem objektivních poznatků o odezvě struktury materiálu na zatěžování. Kromě těchto dvou hlavních vědních disciplín ke studiu únavy materiálů významně přispívají i další obory laboratorní výzkum, fyzikální metalurgie, matematické modelování procesů porušování apod. Pro zastřešující vědní disciplínu, syntetizující poznatky o lomových procesech z nejrůznějších zdrojů, jsme přejali dosud nepříliš často se vyskytující název, použitý před řadou let prof. Yokoborim – "*fraktologie*".

Růst únavové trhliny je výsledkem interakce vlivu mnoha různorodých faktorů, charakterizujících zatěžování, tvar a rozměry tělesa s trhlinou, složení materiálu a jeho strukturní a mechanické vlastnosti, teplotu a další vlastnosti prostředí apod. Vliv některých z uvedených faktorů je ilustrován příklady z inženýrské či laboratorní praxe. Na základě principů lomové mechaniky a empirických poznatků je možno závislost rychlosti šíření únavové trhliny na některých ze zmíněných parametrů (např. na rozkmitu napětí, parametru asymetrie cyklu, frekvenci zatěžování apod.) vyjádřit analyticky. Jedním z geometrických parametrů, ovlivňujících rychlost šíření únavové trhliny, je tloušťka tělesa. Tento vliv je často dáván do souvislosti s přítomností smykových okrajů na lomu. Bylo zjištěno, že šířka smykových okrajů lineárně roste s rostoucím rozkmitem faktoru intenzity napětí ΔK . Byl navržen postup, umožňující provést korekci rozkmitu hnací síly trhliny ΔG , která zohledňuje přítomnost smíšeného módu a stav rovinné napjatosti v oblasti smykových okrajů lomu. Korelace mezi takto korigovanou hodnotou ΔG a rychlostí šíření únavové trhliny je velmi dobrá. Vliv prostředí je ilustrován na příkladu šíření únavové trhliny v austenitické oceli při zvýšené teplotě ve vodním prostředí (simulace provozních podmínek v části jaderného reaktoru). Zvýšení rychlosti šíření únavové trhliny ve vodním prostředí při pokojové teplotě souvisí s podílem intekrystalické dekoheze na procesu porušování. Zvýšení teploty vodního prostředí interkrystalickou dekohezi eliminuje a tedy i snižuje rychlost šíření trhliny.

V práci jsou diskutovány fraktografické aspekty šíření únavových trhlin. Zvýšená pozornost je věnována vztahu mezi roztečí striací a makroskopickou rychlostí šíření. Jsou uvedeny tři příklady fraktografické rekonstrukce časového průběhu procesu porušování. Všechny tyto praktické příklady se týkají únavového porušování reálných částí letadlových konstrukcí.

Fraktologie, vycházející zejména ze syntézy poznatků lomové mechaniky a výsledků kvantitativní fraktografie, představuje sofistikovanou, účinnou metodu výzkumu únavového procesu.

Klíčová slova

lomová mechanika, únava kovových materiálů, rychlost šíření únavové trhliny, kvantitativní fraktografie, rozteč striací, značkování lomů, rekonstrukce časového průběhu šíření únavové trhliny, praktické příklady

Key Words

fracture mechanics, metal fatigue, fatigue crack growth rate, quantitative fractography, striation spacing, fracture marking, reconstitution of fatigue crack growth history, case studies

© ČVUT Praha 2006 ISBN

OBSAH

1. ÚVOD	6
2. ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY	8
2.1 Zatěžování	8
2.2 Geometrie tělesa trhlinou	9
2.3 Materiál	. 12
2.4 Prostředí	. 13
3. FRAKTOGRAFICKÉ ASPEKTY ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÝCH TRHLIN	14
4. FRAKTOGRAFICKÁ REKONSTRUKCE ÚNAVOVÉHO PROCESU	20
4.1 PŘÍKLAD 1	. 20
4.2 PŘÍKLAD 2	. 25
4.3 PŘÍKLAD 3	. 27
5. ZÁVĚR	30
LITERATURA	31
CURRICULUM VITAE	33
KONCEPCE VĚDECKÉ PRÁCE A VÝUKY V DANÉM OBORU	34

1. ÚVOD

Šíření trhlin v tělesech a konstrukcích může vyvolat řadu negativních jevů počínaje degradací užitných vlastností, přes snížení bezpečnosti a spolehlivosti provozu těchto zařízení až po havárie, při kterých dochází ke ztrátám na lidských životech, rozsáhlým ekologickým katastrofám apod. Nejsnáze lze kvantifikovat ztráty ekonomické: v USA se např. odhaduje, že ztráty způsobené lomy dosahují ročně výše 4% HDP [1]. Použijeme-li uvedený odhad v našich podmínkách, pak ztráty způsobené lomy dosahují v ČR výše cca 100 miliard Kč ročně. Na výzkum lomových procesů jsou proto ve světě vynakládány značné finanční prostředky. Jako konkrétní příklad může sloužit Coffinův odhad, že celkové náklady na výzkum, jehož výsledky byly obsahem 130 příspěvků, které byly presentovány v roce 1987 na "*Second International Conference on Low Cycle Fatigue and Elastoplastic Behaviors of Materials*", dosáhly výše asi 13 miliónů dolarů [2]. To odpovídá průměrným nákladům na výzkum, jehož výsledky jsou obsahem jednoho příspěvku, cca 100 000 dolarů.

Výzkum lomových procesů má v současné době výrazně interdisciplinární charakter. Při analýze provozních poruch i při studiu fyzikální podstaty vzniku a šíření trhlin v rámci základního výzkumu se kromě fraktografie a lomové mechaniky využívá zejména fyzikální metalurgie, počítačové mechaniky, matematické statistiky, teorie pravděpodobnosti a celé řady experimentálních metod (např. měření mikrotvrdosti, mikroanalýzy chemického složení apod.). Finální výsledek komplexního výzkumu je pak založen na syntéze všech dílčích, nezávisle získaných poznatků. Pro tento hybridní vědní obor, zabývající se studiem lomových procesů, probíhajících v nejrůznějších pevných látkách, je možno převzít název, který použil v roce 1955 Yokobori [2]: **fraktologie.** Základními stavebními kameny fraktologie jsou fraktografie a lomová mechanika:

Fraktografie, která se zabývá experimentálním studiem lomových ploch, má řadu styčných bodů s tak zdánlivě vzdálenými vědními obory, jako jsou např. patologie a archeologie. Společným rysem je podrobné studium určitého nálezu, nesoucího více či méně zašifrované objektivní informace o reálných jevech, které proběhly před určitým časem. Dešifrování těchto informací přispívá k hlubšímu pochopení studovaných jevů. Takto získané poznatky bývají velmi cenné, neboť jsou v mnoha případech jiným způsobem nedosažitelné.

Konkrétním cílem fraktografie může být např. odhalení primárních příčin lomu, určení místa iniciace, posouzení charakteru lomu ve vazbě na strukturu materiálu, odhad časového průběhu lomového procesu apod. Povrch lomu byl zpočátku sledován pouhým okem či pomocí lupy a fraktografie měla pouze popisný charakter. Postupné zkvalitňování přístrojové techniky (zejména řádkovacích a transmisních elektronových mikroskopů) a vývoj nových metodik možnosti fraktografie značně rozšířily. Jedním ze základních úkolů fraktografie je nalezení korelace mezi morfologickými znaky lomových ploch a odpovídajícími mechanismy porušování, kterými byl sledovaný lomový proces řízen. V případě nalezení této vazby se morfologický znak stává znakem fraktografickým [3],[4]. Kvantifikovatelnost (tj. měřitelnost) některé z charakteristik daného fraktografického znaku pak umožňuje výrazné zkvalitnění a prohloubení poznatků o lomovém procesu a vytvoření objektivních podkladů pro návrh případných nápravných opatření. Kvantifikace výsledků fraktografické analýzy rovněž umožnila efektivní propojení objektivních experimentálních informací o lomu s teoretickými poznatky lomové mechaniky.

S rostoucími možnostmi fraktografie postupně roste význam a úloha této vědní disciplíny při experimentálním ověřování bezpečnosti a spolehlivosti konstrukcí. Fraktografie se aktivně začlenila do výzkumného a vývojového procesu. Příkladem mohou být únavové zkoušky důležitých konstrukčních uzlů či celého draku letadla, které jsou rozhodujícím kriteriem pro posouzení jejich bezpečnosti a spolehlivosti (viz např. [5]). Informační přínos a (tedy i účinnost) těchto velmi nákladných zkoušek lze značně zvýšit vhodnou aplikací fraktografie. Fraktografická analýza se stala nedílnou, zákazníkem vyžadovanou, součástí experimentálního průkazu životnosti letadlové konstrukce [6]. Zatímco dříve začínala fraktografie hrát svoji roli až po ukončení experimentu (tj. byla uplatňována čistě ex-post), dnes je třeba ji brát v úvahu již ve stadiu plánování (viz např. [7],[8]), kterým se aktivně ovlivňuje morfologie lomu. Takto vytvořené značky výsledky fraktografické analýzy významně zpřesňují a zkvalitňují.

Lomová mechanika je vědní disciplínou, která je schopna kompenzovat neadekvátnost klasických konstrukčních metod posuzování únosnosti součástí za provozu v těch případech, kdy je třeba vzít v úvahu existenci defektů (trhlin). Aplikací některého z lomově-mechanických kriterií (viz např. [9]) je možno definovat podmínky vzniku trhliny v kritickém místě součásti, popsat průběh jejího stabilního šíření, řešit otázky související se ztrátou stability této trhliny, navrhnout opatření, která by vzniku a šíření trhlin zabránila apod. Lomová mechanika poskytuje výzkumu lomových procesů teoretickou bázi, umožňující kvantifikovat vzájemnou vazbu mezi podmínkami exploatace (tj. parametry vnějšího zatěžování včetně časově vázaných charakteristik typu počet cyklů, provozu, počet letů, počet ujetých km apod.) doba а parametry charakterizujícími rozsah poškození (tj. např. délka trhliny či velikost porušeného nosného průřezu). V posledních letech dochází ke stále širšímu uplatnění lomové mechaniky při řešení různých problémů v praxi (provozní poruchy, optimalizace konstrukčních návrhů apod.) - viz např. souhrnné práce [10],[11].

Předložený spis shrnuje část výsledků vědecko-výzkumné práce autora, realizované na katedře materiálů FJFI ČVUT v Praze. V práci je uvedeno několik konkrétních příkladů, ilustrujících současné možnosti uplatnění komplexního přístupu ke studiu lomů v oblasti základního i aplikovaného výzkumu procesu únavového porušování těles a konstrukcí.

2. ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÝCH TRHLIN

Primární příčinou převážné většiny všech provozních lomů v praxi je únavový proces, probíhající v tělesech a konstrukcích namáhaných časově proměnným zatěžováním. K prokázání této skutečnosti významně přispělo použití moderních experimentálních metod (zejména řádkovací a transmisní elektronové mikroskopie). Velká zvětšení a vysoká rozlišovací schopnost elektronových mikroskopů umožnily detekovat jednoznačné mikromorfologické znaky únavového procesu i u lomů, které z makroskopického hlediska žádné znaky etapovitosti nevykazovaly. V případě časově proměnného zatěžování dochází ke vzniku a šíření trhliny i při relativně velmi malé úrovni napětí - statické napětí téže velikosti by ve většině případů k dosažení mezního stavu nepostačovalo. Dosáhne-li šířící se únavová trhlina kritické délky, odpovídající při dané úrovni zatěžování lomové houževnatosti materiálu, dojde ke ztrátě stability této trhliny a k náhlému porušení zbylého nosného průřezu tělesa. Je zřejmé, že primární příčinou porušení je únava materiálu.

Šíření únavové trhliny je ovlivněno celou řadou faktorů, které můžeme rozdělit do následujících skupin:

- a) charakteristiky zatěžování (symbolicky ozn. Z),
- b) geometrické charakteristiky (ozn. A),
- c) materiálové charakteristiky (ozn. M),
- d) charakteristiky prostředí (ozn. *T*).

Rychlost šíření únavové trhliny v = da/dN je tedy dána obecným vztahem

$$v = v(Z; A; M; T).$$
 (1)

2.1 Zatěžování

Vliv nejdůležitějších charakteristik zatěžovacího spektra, tj. rozkmitu napětí $\Delta \sigma$, parametru asymetrie cyklu *R* a frekvence *f*, lze vyjádřit ve tvaru [12]

$$da/dN = C.[\Delta K_{ef}]^{m} f^{\lambda} = C.[U(R).\Delta\sigma(\pi a)^{1/2} f(a/W)]^{m} f^{\lambda}, \qquad (2)$$

V citované práci jsme vycházeli z experimentů, realizovaných na zkušebních tělesech z oceli 22 K a hliníkové slitiny typu AlCu4Mg1. Velikost konstanty *C* závisí na všech ostatních faktorech ovlivňujících rychlost šíření únavové trhliny, které ve vztahu (2) explicitně nevystupují. Vztahu (2) bylo použito pro výpočet relativní změny rychlosti šíření únavové trhliny v důsledku změny všech tří sledovaných parametrů $\Delta \sigma$, *R* a *f*. Teoretické výsledky, predikované pomocí výše uvedeného vztahu, byly ve velmi dobré shodě s experimentálními daty [12].

Frekvence zatěžování *f* je faktorem, jehož vlivu je v posledních letech přikládán stále větší význam. Hraje významnou roli např. v případech, kdy je únavový proces ovlivněn prostředím či při aplikaci výsledků únavových zkoušek, realizovaných z ekonomických důvodů při frekvencích o mnoho řádů vyšších než v běžné technické praxi. Význam tohoto faktoru lze ilustrovat na výsledcích únavových zkoušek těles z oceli 22 K, kdy se v důsledku zvýšení

frekvence zatěžování o 2 řády (z f = 0,1 Hz na f = 10 Hz) únavová životnost zvýšila asi čtyřikrát. Frekvence zatěžování v daném případě ovlivnila nejen stadium šíření únavové trhliny, ale i etapu iniciace - při nižších frekvencích docházelo k aktivnímu uplatnění většího počtu povrchových iniciačních center a k porušení nosného průřezu docházelo propojením několika únavových trhlin, zatímco při vyšších frekvencích byl nosný průřez tělesa obvykle narušen šířením jediné magistrální únavové trhliny [13].

2.2 Geometrie tělesa s trhlinou

Vliv některých geometrických charakteristik tělesa s trhlinou (např. šířky tělesa W, délky tělesa L apod.) na ΔK (a tedy i na rychlost šíření únavové trhliny) je do výpočtu zahrnut prostřednictvím tvarové funkce f(a/W). Rychlost šíření únavové trhliny však může být ovlivněna i tloušťkou tělesa B [14]. Tento vliv souvisí se vznikem a vývojem smykových okrajů podél bočních stěn tělesa – jestliže smykové okraje nejsou přítomny, tloušťka tělesa rychlost šíření únavové trhliny neovlivňuje [15]. Při fraktografické analýze těles z Al-slitiny 2024-T42 bylo zjištěno, že šířka smykových okrajů t_s závisí na ΔK_I [16]. Ke vzniku smykových okrajů dochází, dosáhne-li ΔK_I určité hodnoty ΔK_{Is} , která prakticky nezávisí na parametrech zatěžovacího režimu $\Delta \sigma$ a R (viz obr.1 a tab.1). Relativní šířka smykových okrajů t_s/B je lineární funkcí ΔK_I , přičemž gradient této závislosti je nepřímo úměrný $\Delta \sigma$:

$$\frac{t_s}{B} = \frac{A_s}{\Delta\sigma} [\Delta K_I (RD) - \Delta K_{Is}], \qquad (3)$$

kde součinitel A_s je klesající funkcí parametru asymetrie cyklu R. Ze vztahu (3) je zřejmé, že při téže hodnotě ΔK_I šířka smykových okrajů klesá jak s rostoucí hodnotou rozkmitu napětí $\Delta \sigma$, tak s rostoucí hodnotou parametru asymetrie cyklu R.

<i>R</i> [1]	$\Delta\sigma$ [MPa]	ΔK_{Is} [MPa.m ^{1/2}]	$A_s[{\rm m}^{-1/2}]$
0	77,6	7,67	3,99
0	45,0	6,72	4,18
0.2	61,8	6,32	2,08
0.2	33,4	6,39	2,01
0,5	31,3	6,56	1,61

Tab.1 - Charakteristiky zatěžování a regresní parametry závislosti šířky smykových okrajů na $\Delta K_I(RD)$.

Dokud se smykové okraje nezačnou vyvíjet, šíří se únavová trhlina v rovině kolmé na směr vnějšího namáhání, což odpovídá čistému tahovému módu I. V této fázi rychlost šíření únavové trhliny v = da/dN výrazně roste s rostoucím rozkmitem faktoru intenzity napětí ΔK_I , resp. s rostoucí délkou trhliny *a*.



Obr.1 – Příklady závislosti relativní šířky smykových okrajů t_s/B na ΔK pro tři různé zatěžovací režimy - Al-slitina 2024-T42 (podle [16]).

Dosáhne-li ΔK_I mezní hodnoty ΔK_{Is} , začínají se na lomové ploše vytvářet smykové okraje. Důsledkem vzniku a vývoje smykových okrajů je snížení gradientu závislosti rychlosti šíření únavové rychlosti $v = v(\Delta K_l)$, resp. v = v(a)Tuto skutečnost lze vysvětlit přechodem od čistě tahového módu ke smíšenému módu (obecně I+II+III). Z orientace lomových ploch na porušených zkušebních tělesech je zřejmé, že makroskopický směr šíření únavové trhliny se prakticky nemění a zůstává kolmý na směr vnějšího namáhání. Díky tomu lze vliv rovinného smykového módu II zanedbat a předpokládat, že v oblasti smykových okrajů se únavová trhlina šíří ve smíšeném módu I+III. Kromě toho se zde stav rovinné deformace (RD) mění na stav rovinné napjatosti (RN). Podíl antirovinného smykového lomu III a stavu RN roste s rostoucí šířkou smykových okrajů t_s . Při určité délce trhliny *a* je podíl lomu, odpovídajícího čistému tahovému módu I ve stavu rovinné deformace, dán poměrem $(B-2t_s)/B$ a podíl šikmého lomu, odpovídajícího smíšenému módu I+III ve stavu rovinné napjatosti, poměrem $2t_s/B$. Tuto skutečnost je možno vzít v úvahu korekcí rozkmitu hnací síly trhliny ΔG , kterou vyjádříme jako součet tří částí $\Delta G_{l}(RD)$, $\Delta G_{I}(RN)$ a ΔG_{III} s vahami odpovídajícími fraktograficky stanovenému podílu daného typu lomu, tj.

$$\Delta G = \frac{B - 2t_s}{B} \Delta G_I(RD) + \frac{2t_s}{B} \left[\Delta G_I(RN) + \Delta G_{III} \right]$$
(4)

kde

$$\Delta G_{I}(RD) = \frac{1 - v^{2}}{E} \left(K_{I,\max}^{2} - K_{I,\min}^{2} \right) = \frac{1 - v^{2}}{E} \cdot \frac{1 + R}{1 - R} \Delta K_{I}^{2}(RD)$$
(5)

$$\Delta G_I(RN) = \frac{1}{E} \left(K_{I,\max}^2 - K_{I,\min}^2 \right) = \frac{1}{E} \cdot \frac{1+R}{1-R} \Delta K_I^2(RN)$$
(6)

$$\Delta G_{III} = \frac{1+\nu}{E} \left(K_{III,\max}^2 - K_{III,\min}^2 \right) = \frac{1+\nu}{E} \cdot \frac{1+R}{1-R} \Delta K_{III}^2 \,. \tag{7}$$

Pro těleso s centrální trhlinou lze za zjednodušujícího předpokladu, že smykové okraje svírají s původní rovinou lomu úhel 45°, vztah (4) upravit do tvaru

$$\Delta G = \frac{\pi a \Delta \sigma^2}{2E} \cdot \frac{1+R}{1-R} \left\{ \left[2\left(1-\nu^2\right) \frac{B-2t_s}{B} + \frac{t_s}{B} \right] \cdot \left[\cos\left(\frac{\pi a}{2W}\right) \right]^{-1} + \left(1+\nu\right) \frac{t_s}{B} \cdot \frac{2W}{\pi a} tg\left(\frac{\pi a}{2W}\right) \right\}.$$
 (8)



 ΔG a na délce únavové trhliny *a* (*R* = 0, $\Delta \sigma$ = 45 MPa). Podle [16].

Rychlost šíření únavové trhliny v = da/dN je z hlediska lineární lomové mechaniky řízena rozkmitem faktoru intenzity napětí ΔK , resp. rozkmitem hnací síly trhliny ΔG . Na obr.2 je jako příklad uvedena závislost rychlosti šíření únavové trhliny na délce trhliny pro jedno ze sledovaných zkušebních těles. V oblasti vzniku a vývoje smykových okrajů dochází k výraznému poklesu gradientu této závislosti. Analogický průběh má i závislost rozkmitu hnací síly ΔG , stanovená pomocí vztahu (8). Korelace mezi rychlostí šíření únavové trhliny a korigovanou hodnotou ΔG je zřejmá. Na uvedeném obrázku je pro porovnání znázorněna i závislost rozkmitu hnací síly ΔG , při jehož výpočtu podle vztahu (5) nebyla provedena korekce na smíšený mód porušování. Průběh této závislosti má zcela odlišný charakter – nevykazuje snížení gradientu v oblasti vzniku a vývoje smykových okrajů a tudíž neodpovídá průběhu závislosti rychlosti šíření trhliny.

2.3 Materiál

Rychlost šíření únavové trhliny je ovlivněna chemickým složením, strukturou, texturou, mechanickými vlastnostmi a dalšími charakteristikami materiálu. Vliv složení lze ilustrovat na slitině typu AlCu4Mg1 – příspěvek [17] shrnuje výsledky experimentálního výzkumu, zaměřeného na ověření vlivu čistoty této slitiny na její únavové vlastnosti.



Hlavním cílem úkolu, v jehož rámci byl tento experimentální výzkum prováděn, byl vývoj nových typů hliníkových slitin určených pro letecký průmysl. Únavové zkoušky byly realizovány na tělesech, vyrobených z laboratorně připravených taveb slitiny uvedeného typu, lišících se obsahem Fe a Si. Etapa iniciace únavových trhlin na ostrém vrubu čistotou materiálu (tj. obsahem Fe a Si) významně ovlivněna nebyla. V etapě makroskopického šíření únavové trhliny však mělo snížení obsahu nečistot významný vliv: pokles součtové koncentrace Fe a Si z hodnoty 0,57% na 0,16% vedlo ke snížení střední hodnoty makroskopické rychlosti šíření únavové trhliny o (65 až 80)%

v celém sledovaném rozsahu rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK (viz obr.3). Uvedený pozitivní vliv zvýšení čistoty sledované slitiny je však provázen zvýšením rozptylu naměřených hodnot da/dN, charakterizovaného např. šířkou konfidenčního pásma pro regresní přímky závislosti $da/dN = f(\Delta K)$.

2.4 Prostředí

Rychlost šíření únavové trhliny je ovlivněna chemickým složením prostředí (resp. parciálním tlakem jednotlivých složek), jeho skupenstvím, teplotou, pH-faktorem, radiačním zářením apod.



Obr.4 – Závislost $v = v(\Delta K)$ pro austenitickou ocel AISI 304L: vliv vodního prostředí v primárním okruhu JE při pokojové teplotě (vlevo), vliv zvýšené teploty ve vodním prostředí (vpravo) [18],[19].

Působí-li na šíření únavové trhliny synergicky několik z uvedených faktorů, může docházet k výrazné interakci. Příkladem může být působení vodního prostředí a zvýšené teploty na únavové chování austenitické oceli AISI 304L. Na obr.4 vlevo je uvedena závislost $v = v(\Delta K)$ při pokojové teplotě jednak na vzduchu, jednak ve vodním prostředí (tzv. B-vodě), simulující podmínky v primárním okruhu jaderné elektrárny. Agresivní vodní prostředí způsobuje, že se na šíření únavové trhliny částečně podílí i interkrystalická dekoheze, což vede ke zvýšení rychlosti šíření – viz obr.5 [19]. Naznačený vliv prostředí klesá s rostoucí hodnotou ΔK . Zvýšením teploty vodního prostředí na T = 300°C je podíl interkrystalické dekoheze eliminován. Důsledkem je, že při této zvýšené teplotě je rychlost šíření únavové trhliny asi o 60% nižší, než při teplotě pokojové – viz obr.4 vpravo [18],[19].



Obr.5 – Závislost poměru rychlosti šíření únavové trhtrhliny ve vodním prostředí a na vzduchu na podílu interkrystalických faset na lomu [19].

3. FRAKTOGRAFICKÉ ASPEKTY ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÝCH TRHLIN

Typickým mikrofraktografickým znakem únavových lomů řady kovových konstrukčních materiálů jsou striace. Rozměrové charakteristiky striací, tj. jejich rozteč, výška a délka (resp. šířka pole) [20],[21], obsahují kvantitativní informaci o lokální odezvě materiálu na časově proměnné zatěžování, kterému je těleso s trhlinou vystaveno. Pro řešení otázek, souvisejících s únavovou životností těles a konstrukcí, je cenným zdrojem poznatků zejména rozteč striací *s*, na jejímž základě lze stanovit makroskopickou rychlost šíření trhliny *v* (viz např. [22] až [24]).

Za určitých podmínek, závislých zejména na parametrech zatěžování a na prostředí, se mohou spolu s mechanismem tvorby striací na procesu šíření trhlin

podílet i jiné mechanismy porušování, např. tvárný lom, interkrystalická dekoheze, štěpný lom, creep, koroze pod napětím apod. V těchto případech lze výslednou rychlost šíření trhliny vyjádřit např. jako sumu jednotlivých dílčích příspěvků, jejichž velikost z hlediska lomové mechaniky obecně závisí zejména na rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK a maximální hodnotě K_{max} , resp. na parametru asymetrie cyklu $R = 1 - \Delta K/K_{max}$, tj.

$$v(\Delta K, R) = \sum_{j=1}^{m} v_j(\Delta K, R), \qquad (9)$$

kde *m* = počet mechanismů porušování, podílejících se na procesu šíření trhliny.

Uvedený aditivní vztah odpovídá superpozici parciálních příspěvků [25]. Příkladem mohou být kombinované účinky únavového procesu a koroze [26] zejména typu vodíkového zkřehnutí.

Spolupůsobení několika mechanismů lze rovněž vyjádřit ve formě multiplikativní [24], která umožňuje lépe postihnout případné interakce mezi jednotlivými vlivy (např. kombinace únavy a koroze pod napětím):

$$v(\Delta K, R) = \prod_{j=1}^{m} g_j(\Delta K, R).$$
(10)

Vztah (10) lze např. využít při rekonstrukci časového průběhu šíření únavové trhliny, založené na měření rozteče striací. Závislost mezi makroskopickou rychlostí šíření únavové trhliny v a roztečí striací s lze vyjádřit ve tvaru

$$v = D \cdot s \,. \tag{11}$$

Součinitel *D* je funkcí tří hlavních faktorů, kterými jsou (viz např. [22],[23]): a) počet jalových cyklů (ozn. n - 1),

- b) odchylka lokálního směru šíření únavové trhliny od směru makroskopického (definovaná úhlem \mathcal{P}),
- c) podíl jiných mechanismů porušování na procesu šíření trhliny, který lze kvantifikovat četností výskytu odpovídajících mikrofraktografických znaků na lomové ploše, tj. např. rozdílem $(1 p_s)$, kde p_s udává plošný podíl polí striací na lomové ploše.

Naznačenou závislost lze vyjádřit ve tvaru

$$D = \frac{1}{n} \cdot \cos \vartheta \cdot f(p_s) \,. \tag{12}$$

Vzhledem k tomu, že velikost všech tří uvedených faktorů (tj. n, \mathcal{G} i p_s) obecně závisí na ΔK a R, je na těchto veličinách závislá i velikost součinitele D.

Dosadíme-li do rovnice (11) za *D* pomocí vztahu (12), dostáváme (podrobněji viz např. [27],[28])

$$v = s \cdot \frac{1}{n} \cdot \cos \vartheta \cdot f(p_s). \tag{13}$$

Syntézou experimentálních, fraktograficky získaných, údajů s teoretickými závěry lomové mechaniky je možno poznatky o reálném průběhu procesu únavového porušování výrazně prohloubit. Křivka závislosti $v(\Delta K)$, znázorněná v logaritmických souřadnicích, má typický esovitý tvar. Tato závislost bývá obvykle členěna na tři oblasti, ozn. I, II a III. Oblast I se nachází těsně nad prahovou hodnotou rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK_p , oblast III těsně pod "kritickou" hodnotou $\Delta K_c = (1-R).K_{cf}$ (R je parametr asymetrie cyklu, K_{cf} je únavová lomová houževnatost), při které dochází ke ztrátě stability trhliny. V oblasti II je závislost $v(\Delta K)$ obvykle popisována Parisovým vztahem, tj. $v = C(\Delta K)^n$, jehož grafem v logaritmických souřadnicích je přímka. Podrobnější, zejména mikrofraktografické studium šíření únavové trhliny provedené v pozdějších letech naznačilo, že směrnice této přímky se v důsledku postupných kvantitativních i kvalitativních změn mikromechanismů porušování mění a graf závislosti $v = v(\Delta K)$ v oblasti II má spíše multilineární charakter - střední část závislosti je možno rozdělit např. na čtyři podoblasti (ozn. IIa, IIb, IIc a IId [23] - viz obr.6), jejichž rozsah (a tedy i význam) může být u různých slitin výrazně odlišný.





Obr.6 – Kvalitativně odlišné etapy růstu únavové trhliny [23].

Ve stadiu IIa má únavový lom v důsledku výrazného vlivu mikrostruktury materiálu krystalografický charakter - typickým fraktografickým znakem jsou fasety. Striace se zde nevyskytují. Přechod do následujícího stadia IIb odpovídá okamžiku, kdy rozměr cyklické plastické zóny před čelem trhliny ve stavu rovinné deformace dosáhne velikosti subzrna, resp. velikosti dislokační buňky [29].

Ve stadiu IIb se na lomové ploše objevují striace, jejichž rozteč je však zde prakticky konstantní (řádově s $\approx 10^{-7}$ m) (viz např. [22],[27]). Makroskopická rychlost v je menší než rozteč striací s, což je důsledkem jednak existence jalových cyklů (tj. k > 1), jednak odchylky lokálního směru šíření od směru makroskopického ($\mathcal{P} \neq 0$, tj. cos $\mathcal{P} < 1$). Poměr D = v/s s rostoucí hodnotou ΔK roste. Přechod do stadia IIc je opět vázán na mikrostrukturu materiálu - toto rozhraní odpovídá okamžiku, kdy rozměr monotónní plastické zóny před čelem trhliny ve stavu rovinné deformace dosáhne velikosti zrna [29].

Ve stadiu IIc má již růst únavové trhliny homogenní charakter (tj. k = 1), poměr D = v/s je prakticky konstantní a jeho velikost se pohybuje kolem 1 – konkrétní hodnota D je výsledkem vlivu dvou výše uvedených protichůdných faktorů, kterými jsou divergence lokálních vektorů rychlosti šíření a určitý podíl statických mikromechanismů na procesu šíření (štěpné porušení vměstků, interkrystalická dekoheze probíhající v určité strukturní fázi slitiny apod.). Přechod do následujícího stadia IId odpovídá obvykle okamžiku, kdy se na lomové ploše houževnatého materiálu objeví tvárné důlky.

Ve stadiu IId s rostoucím ΔK na úkor polí striací postupně narůstá plošný podíl tvárného lomu na lomové ploše. V této fázi tedy platí D = v/s > 1, přičemž funkce $D(\Delta K)$ má rostoucí charakter.

Důsledkem uvedených, fraktograficky definovaných, kvantitativních i kvalitativních rozdílů mezi mikromechanismy porušování v jednotlivých stádiích šíření jsou makroskopicky detekované rozdíly ve směrnicích odpovídajících lineárních úseků, které znázorňují závislost $v(\Delta K)$ v logaritmických souřadnicích – viz schematický graf na obr.6. V příspěvku [23] jsou odvozeny vztahy pro výpočet parametrů C_i a m_i (i = a,b,c,d) modifikovaného Parisova zákona

$$v = C_i \cdot (\Delta K)^{m_i} \quad (i = a, b, c, d) \quad , \tag{14}$$

platného v jednotlivých úsecích IIa, IIb, IIc a IId. Většinu těchto parametrů lze určit fraktograficky. Při zpracování experimentálních dat typu v = $v(\Delta K)$ je pro objektivní rozdělení oblasti II na úseky IIa až IId třeba použít vhodný matematicko-statistický aparát. Pro tyto účely byl navržen výpočetní program [30], který pomocí metody nejmenších čtverců umožňuje odhadnout jak regresní parametry C_i a m_i (i = a,b,c,d) závislosti (14), tak i hranice mezi jednotlivými úseky.

Objektivní informace o tom, jaké mikromechanismy se na procesu šíření únavové trhliny v daném případě podílely, poskytuje fraktografická analýza lomových ploch, při které lze identifikovat jednotlivé mikrofraktografické znaky jednoznačně odpovídající určitému mechanismu porušování. Příkladem mohou být tvárné důlky, které vznikají v důsledku koalescence mikroporuch, ke které dochází při tvárném lomu houževnatých materiálů. Míru uplatnění dílčích mechanismů na procesu porušování lze z fraktografického hlediska kvantifikovat četností výskytu odpovídajících mikrofraktografických znaků na lomové ploše. Je zřejmé, že pro součet těchto podílů (ozn. p_j , kde $0 \le p_j \le 1$, j = 1, 2, ..., m) platí

$$\sum_{j=1}^{m} p_{j}(\Delta K, R) = 1.$$
 (15)



Obr.7 - Závislost poměru D = v/s na plošném podílu polí striací p_s na lomové ploše těles ze slitiny typu AlCu4Mg1. Snímky z řádkovacího elektronového mikroskopu: **A**: $p_s = 0,049$, $s = 2,09 \,\mu\text{m}$, $\Delta K = 43,1 \,\text{MPa.m}^{1/2}$, **B**: $p_s = 0,812$, $s = 0,664 \,\mu\text{m}$, $\Delta K = 22,9 \,\text{MPa.m}^{1/2}$ (podle [24] a [31]).

Podíl jednotlivých mechanismů na procesu šíření trhliny závisí nejen na explicitně uvedených veličinách ΔK a R, ale i na řadě dalších faktorů - zejména na typu materiálu, frekvenci zatěžování, prostředí, teplotě apod. Např. při únavovém porušování těles ze slitiny AlCu4Mg1 dochází za normálních podmínek (tj. na vzduchu a za pokojové teploty) k výraznějšímu uplatnění nestriačních mechanismů porušování zejména v závěrečné etapě šíření únavové trhliny IId (viz obr.6), ve které se rostoucí měrou začíná na procesu porušování podílet tvárný lom. S postupně rostoucím ΔK klesá podíl polí striací p_s a naopak roste podíl tvárného lomu na lomové ploše. Důsledkem je růst součinitele D = v/s. Experimentálně stanovená závislost $D = D(p_s)$ je uvedena na obr.7 (podrobněji viz [24] a [31]) a porovnána s obdobnými výsledky z literatury.



Obr.8 - Závislost poměru D = v/s na podílu interkrystalického lomu p_{ns} na tělesech z oceli AISI 304L v B-vodě (podle [18] a [33]).

Jiným příkladem mohou být výsledky, získané při únavových zkouškách těles z korozivzdorné oceli AISI 304 L za pokojové teploty ve vodním prostředí (tzv. B-vodě), které simuluje podmínky v primárním okruhu jaderného reaktoru [18], [33]. Při fraktografické analýze lomů těles bylo zjištěno, že v oboru ($17 < \Delta K < 35$) $MPa.m^{1/2}$ bvl hlavním mechanismem porušování transkrystalický lom charakterizovaný tvorbou striací. Kromě tohoto mechanismu se na šíření únavové trhliny v důsledku vlivu vodního prostředí podílela i interkrystalická dekoheze. Na rozdíl od předchozího případu však plošný podíl interkrystalických faset p_{ns} na lomových plochách těles s rostoucím ΔK klesal. Ve sledovaném stadiu šíření (IIc) lze předpokládat, že vliv jalových cyklů je prakticky zanedbatelný, tj. ve vztahu (12) n = 1. Z experimentálně stanovených závislostí $v(\Delta K)$, $s(\Delta K)$ a $p_{ns}(\Delta K)$ byla obdobně jako v případě Al-slitiny 2024 odvozena závislost $D(p_s)$ (viz obr.8), která byla aproximována regresní přímkou. Vliv interkrystalické dekoheze na rychlost šíření únavové trhliny je v tomto případě velmi výrazný - např. pětiprocentní podíl interkrystalického lomu $(p_{ns} = 0.05)$ vede ke zvýšení rychlosti šíření v porovnání s roztečí striací o 56%.

4. FRAKTOGRAFICKÁ REKONSTRUKCE ÚNAVOVÉHO PROCESU

Fraktografická analýza lomových ploch je cenným a mnohdy nenahraditelným zdrojem objektivních informací o vzniku a šíření únavových trhlin. Tyto informace jsou zakódovány do morfologie lomové plochy. Rozsah a kvalita získaných poznatků proto úzce závisejí na naší schopnosti tyto informace nalézt, dekódovat a interpretovat tak, aby měly bezprostřední přínos pro řešení daného problému ve výrobní, či výzkumné praxi – např. při řešení problematiky zvyšování únavové životnosti, bezpečnosti a spolehlivosti letadel.

Možnost fraktografické rekonstrukce časového průběhu procesu únavového porušování je podmíněna existencí a detekovatelností takového fraktografického znaku, jehož kvantifikovatelná charakteristika obsahuje informaci o rychlosti šíření únavové trhliny. Těmito fraktografickými znaky jsou u celé řady hliníkových, titanových a niklových slitin i u ocelí striace, jejichž rozteč *s* obsahuje informaci o lokální rychlosti šíření únavové trhliny v mikroobjemu materiálu. Konkrétní postup při fraktografické rekonstrukci časového průběhu procesu únavového porušování závisí jednak na charakteru zatěžovacího spektra porušovaného tělesa (monotónní zatěžování, zatěžování programovými bloky, náhodné zatěžování, ...), jednak na dalších informacích, které máme k dispozici (např. znalost poměru makroskopické rychlosti v a rozteče striací *s* a makroskopických údajů týkajících se průběhu procesu únavového porušování daného tělesa apod.). Kvalita výstupních informací závisí též na tom, zda bylo možno použít značkování lomů či nikoliv.

Následující tři příklady aplikace fraktografické rekonstrukce v rámci výzkumu únavového porušování komponent letadlových konstrukcí ilustrují možnosti uplatnění těchto postupů v praxi při řešení problematiky životnosti reálných konstrukčních částí. Uvedené případy se liší zejména charakterem použitého časově proměnného zatěžování.

4.1 PŘÍKLAD 1

Ve zkušebně CLKV FSI VUT v Brně byla provedena únavová zkouška modelu nosníku křídla letounu LM200 Loadmaster [34] – viz obr.9. Stojina nosníku vyrobená z Al-slitiny D16čATV byla snýtována s pásnicemi, tvořenými L-profily vyrobenými z Al-slitiny Z424203.61.



Obr.9 – Model nosníku křídla letounu pro únavovou zkoušku [34].

Model nosníku byl při únavové zkoušce zatěžován čtyřbodovým cyklickým ohybem s konstantní amplitudou síly, která v kritických místech vyvolávala napětí $\sigma_{max} = 100$ MPa, odpovídající přibližně maximálním hodnotám v zatěžovacích spektrech, používaných při zkouškách životnosti dopravních letounů. V průběhu zkoušky byla makroskopicky sledována poloha čel únavových trhlin, šířících se v kritických místech stojiny nosníku. Pro následnou podrobnou fraktografickou analýzu únavového porušení [35] byly vybrány poruchy v místě C1 (obr.10). Ve stojině nosníku se šířily dvě trhliny (obr.11): trhlina C1S1 se šířila směrem ke spodnímu okraji nosníku, trhlina C1S2 se šířila směrem opačným. Růst trhliny C1S2 bylo v průběhu zkoušky možno makroskopicky sledovat až od okamžiku, kdy trhlina nebyla překryta svislým ramenem pásnice, tj. od délky a > 25,5 mm. Dolní pásnice byla porušena dvěma únavovými trhlinami (ozn. C1P1 a C1P2), které se protisměrně šířily z otvoru pro nýt – viz obr. 12.



Obr.10 – Únavová trhlina ve stojině nosníku [34].



Obr. 11 - Část porušené stojiny nosníku s označením trhlin [35].



Obr. 12 - Celkový pohled na porušenou dolní pásnici s označením trhlin [35].

Šíření všech uvedených únavových trhlin probíhalo především mechanismem tvorby striací. Byla změřena rozteč striací s v závislosti na délce trhliny a. Soubory dat typu (s_i , a_i), získané při kvantitativní mikrofraktografické analýze, byly použity pro rekonstrukci časového průběhu šíření únavových trhlin. Vliv vstupních apriorních informací na kvalitu fraktograficky rekonstruovaných růstových křivek byl ověřen přijetím několika alternativních hypotéz, na jejichž základě byla rekonstrukce provedena:

Hypotéza H0 - předpokládáme:

- a) známe dvě dvojice navzájem si odpovídajících dat $(N_i, a_i), i = 1, 2,$
- b) D = v/s = konstanta (neznámé velikosti).

Hypotéza H1 - předpokládáme:

- a) známe jednu dvojici navzájem si odpovídajících dat (N_i, a_i) ,
- b) v praxi často nekriticky používanou rovnost v = s, tj. D = 1.

Hypotéza H2 - předpokládáme:

- a) známe jednu dvojici navzájem si odpovídajících dat (N_i, a_i) ,
- b) známe závislost D = D(s), získanou zpracováním dat z literatury [32] pro obdobný typ Al-slitiny (2024-T3):

 $D = 2,21 \cdot s^{0,555}$ pro $(0,1 \le s \le 1,4)$ µm.

Hypotéza H3 - předpokládáme:

- a) známe jednu dvojici navzájem si odpovídajících dat (N_i, a_i) ,
- b) známe závislost D = D(s), získanou zpracováním dat z literatury [36] pro různé konstrukční slitiny:

 $D = 3,15 \cdot s^{1,13}$ pro $(0,2 \le s \le 3,3) \,\mu\text{m}$.

Hypotéza H4 - předpokládáme:

- a) známe jednu dvojici navzájem si odpovídajících dat (N_i, a_i) ,
- b) známe závislost D = D(s), stanovenou na základě vlastních experimentálních dat [22], ve tvaru spojité regresní funkce:

$$D = 1,797 \cdot 10^{45} \cdot \frac{s^{0,1108}}{(79,55-s)^{23,84}}, \text{ pro } (0,059 \le s \le 4,74) \,\mu\text{m}.$$

Hypotéza H5 - předpokládáme:

- a) známe jednu dvojici navzájem si odpovídajících dat (N_i, a_i) ,
- b) známe závislost D = D(s), stanovenou na základě vlastních experimentálních dat [23], ve formě třech na sebe navazujících intervalů:

$$D = 1,445 \cdot s^{0,3131} \text{ pro } (0,059 \le s \le 0,162) \mu\text{m},$$

$$D = 1,002 \cdot s^{0,1119} \text{ pro } (0,162 \le s \le 0,886) \mu\text{m},$$

$$D = 1,092 \cdot s^{0,8178} \text{ pro } (0,886 \le s \le 4,742) \mu\text{m}.$$

Obecná metodika rekonstrukce je podrobně popsána např. v [22],[37],[38]. Konkrétní postup závisí na typu a rozsahu informací, které máme a priori k dispozici. V dalších úvahách se omezíme na dvě základní možnosti:

a) Známe-li alespoň dvě dvojice navzájem si odpovídajících dat (N_i , a_i), i = 1,2, postačuje předpoklad D = konst, aniž bychom číselnou hodnotu této konstanty předem znali. Při rekonstrukci růstové křivky vycházíme v tomto případě z rovnice

$$N_{x} = N_{1} + (N_{2} - N_{1}) \cdot \frac{\int_{a_{1}}^{a_{x}} \frac{da}{s(a)}}{\int_{a_{1}}^{a_{2}} \frac{da}{s(a)}},$$
(16)

Tento postup byl zvolen v případě hypotézy H0.

b) Známe-li jednu dvojici navzájem si odpovídajících dat (N_i, a_i) a závislost D = D(s), vycházíme při rekonstrukci růstové křivky z rovnice

$$N_{x} = \int_{a_{i}}^{a_{x}} \frac{da}{D(s) \cdot s(a)} + N_{i} .$$
 (17)

Tento postup byl zvolen v případě hypotéz H1 až H5.

Pro trhlinu C1S2 ve stojině nosníku byly k dispozici výsledky makroskopického měření v intervalu (68 227 $\le N \le 117500$) cyklů, resp. (25,5 $\le a \le 98,5$) mm. Na základě porovnání fraktograficky rekonstruované růstové křivky s výsledky tohoto přímého optického měření bylo možno objektivně posoudit plausibilnost předpokladů, charakterizujících jednotlivé hypotézy, a optimalizovat tak postup při rekonstrukci. V případě hypotézy H0 byly pro výpočet použity dvojice (N = 68225, a = 25,5 mm) a (N = 117500, a = 98,5 mm), odpovídající minimální a maximální délce trhliny při makroskopickém měření, v případě hypotéz H1 až H5 pouze druhá z uvedených dvojic.

Nejlepší shody fraktograficky rekonstruované růstové křivky s reálnými hodnotami stanovenými přímou optickou metodou bylo dosaženo v případě použití hypotézy H4 – viz obr.13. Na tomto obrázku je rovněž znázorněn výsledek fraktografické rekonstrukce za předpokladu, že makroskopická rychlosti šíření únavové trhliny je ztotožněna s roztečí striací (tj. D = 1 - viz hypotéza H1) – nesoulad s výsledky přímého sledování je zřejmý.



C1S2 podle hypotéz H1 a H4 s výsledky optického měření [35].

Hypotézy H4 jsme použili i pro rekonstrukci růstových křivek druhé trhliny ve stojině (ozn. C1S1 - viz obr.11) a obou trhlin v pásnici (C1P1 a C1P2 - viz obr.12). Výsledky rekonstrukce jsou shrnuty v grafu na obr.14, ze kterého je zřejmá časová souslednost jednotlivých poruch a jejich vzájemná interakce.





4.2 PŘÍKLAD 2

V případě zatěžování programovými bloky, deterministicky simulujícími určitou specifickou část provozního zatěžování, lze pro fraktografickou rekonstrukci využít vhodných inherentních složek daného programového spektra. Tyto programové bloky jsou tvořeny určitým počtem cyklů různých parametrů. Některé složky těchto bloků (např. cykly s největším rozkmitem či největší maximální hodnotou) zanechávají na lomové ploše opakující se stopy, mající charakter postupových čar. Jsou-li tyto postupové čáry při fraktografické analýze identifikovatelné, lze jich využít pro rekonstrukci časového průběhu procesu únavového porušování daného tělesa či konstrukce (viz např. [39]). Zanechá-li každý programový blok na lomové ploše jednu postupovou čáru daného typu, pak vzdálenost dvou sousedních postupových čar (tj. jejich rozteč s_n) určuje přírůstek délky trhliny za jeden programový blok. Na základě kvantitativního fraktografického nálezu, vyjádřeného ve formě závislosti $s_p = s_p(a)$, kde *a* je délka trhliny, pak lze provést rekonstrukci únavového procesu obdobným způsobem, jako v případě měření rozteče striací (viz PŘÍKLAD 1). Zatěžování programovými bloky má však tu výhodu, že v tomto případě odpadá problém se vztahem mezi mikroskopickou a makroskopickou rychlostí šíření únavové trhliny.

Sledování postupových čar poskytuje informace též o časových změnách polohy a tvaru čela únavové trhliny, což umožňuje převést obvyklý jednorozměrný popis procesu porušování typu a = a(N) na popis dvourozměrný, vyjádřený ve formě časové závislosti zbytkového nosného průřezu A = A(N), což je zvláště významné u těles složitější geometrie.



Obr.15 - Programové zatěžovací spektrum, kterého bylo použito při únavové zkoušce křídla dopravního letounu L 410 UVP [40].

Konkrétním příkladem mohou být výsledky únavové zkoušky křídla dopravního letounu L 410 UVP, provedené v dynamické zkušebně VZLÚ Praha-Letňany [40]. Při této zkoušce byl použit zatěžovací programový blok (ozn. PB), tvořený 16 programovými cykly (ozn. PC), z nichž každý simuloval jeden let, a jedním výrazným cyklem (ozn. P), simulujícím nejsilnější poryv větru 6,8 m/s - viz obr.15. Každý PB = 16 PC + P se tak skládal celkem ze 193 cyklů různých parametrů.



Obr.16 - Fraktografická rekonstrukce průběhu únavového porušování pásnice nosníku křídla malého dopravního letounu. Poloha čela trhliny je uvedena v závislosti na počtu aplikovaných programových cyklů, tj. simulovaných letů. Postupové čáry odpovídají kmitům P (viz obr.15), simulujícím poryv větru 6,8 m/s [41].

Periodicky se opakující poryvové cykly zanechaly na lomových plochách porušených částí křídla letounu mikroskopicky identifikovatelné stopy ve formě postupových (tzv. poryvových) čar. Vzdálenost mezi sousedními poryvovými čarami jednoznačně určuje přírůstek délky trhliny za jeden programový blok PB. Při kvantitativní fraktografické analýze lomových ploch [41] byla proměřena závislost rozteče poryvových čar na délce trhliny $s_p = s_p(a)$. Získaná data umožnila zrekonstruovat polohu a tvar čela sledovaných únavových trhlin v závislosti na čase, který v tomto případě byl charakterizován celkovým počtem aplikovaných programových cyklů PC. Na obr.16 je výsledek fraktografické únavového porušování pásnice nosníku rekonstrukce křídla letounu zatěžovaného programovým spektrem uvedeným na obr.15 znázorněn ve formě dvourozměrné presentace, ze které je zřejmá mimo jiné i postupná změna tvaru čela únavové trhliny a směru jejího šíření.

4.3 PŘÍKLAD 3

V případě složitějších zatěžovacích spekter, simulujících v laboratoři provozní podmínky (zejména spekter majících náhodný charakter), nelze fraktografickou rekonstrukci založit ani na měření rozteče striací, ani na měření rozteče postupových čar, které by byly jednoznačně vázány k určité konkrétní inherentní složce opakujícího se programového bloku. V těchto případech je třeba zatěžovací režim vhodným způsobem upravit. To lze realizovat buď přeskupením či náhradou některých inherentních částí spektra nebo začleněním speciálních značkovacích cyklů či bloků. V případě použití značkování se významně mění postavení, které fraktografie zastává v rámci komplexního experimentálního výzkumu problematiky únavové životnosti, bezpečnosti a spolehlivosti cyklicky zatěžovaných konstrukcí. Obvykle bývá fraktografická analýza posledním článkem v řetězci aplikovaných experimentálních metod. Při použití značkování je však třeba řadu souvisejících otázek řešit ještě před realizací vlastní únavové zkoušky - jde např. o návrh způsobu a četnosti značkování, jeho experimentální ověření na jednoduchých tělesech (vyrobených z téhož materiálu a zatěžovaných obdobně jako daná konstrukce), začlenění značkovacích změn do zatěžovacího režimu, analýzu vlivu těchto změn na únavový proces apod. Velkou výhodou této metody je, že při její aplikaci dochází k souběžnému značkování všech trhlin, které se v jednotlivých částech složité konstrukce v daném okamžiku šíří - tedy i trhlin, o jejichž existenci nevíme nebo které jsou díky konstrukčnímu uspořádání nepřístupné a jejich rozvoj nelze žádnou jinou metodou průběžně sledovat.

Na značkování jsou kladeny dva základní požadavky:

- a) jednoznačná čitelnost a identifikovatelnost značek na lomové ploše,
- b) minimální ovlivnění průběhu procesu únavového porušování.

Hlavním problémem, se kterým se při navrhování konkrétního způsobu značkování musíme vyrovnat, je zřejmá protichůdnost uvedených dvou požadavků. Pokud by značky měly být spolehlivě čitelné pouhým okem či pomocí lupy, pak by zásah do původního zatěžovacího režimu musel být výrazný a tudíž spojený s rizikem podstatného ovlivnění kinetiky únavového procesu. Druhým extrémem je použití velmi subtilních úprav zatěžovacího režimu, které by sice proces šíření únavového porušování ovlivnily minimálně, ale k detekci příslušných značek na lomové ploše by bylo zapotřebí zvětšení řádu 10⁵, podmíněné použitím transmisního elektronového mikroskopu. Ze zkušeností fraktografického pracoviště katedry materiálů FJFI ČVUT vyplývá, že optimálním kompromisem je použití značek, identifikovatelných řádkovacím elektronovým mikroskopem při zvětšení řádu 10² až 10⁴.

Značkování pomocí speciálních bloků, zařazených do zatěžovacího spektra, bylo použito např. v případě únavové zkoušky draku letounu L 39 MS [42]. Zatěžování typu "let za letem" bylo realizováno pomocí simulace znáhodněného pořadí zatěžovacích účinků ze záznamu provozního spektra letounu.



Obr.17 – Schéma části zatěžovacího spektra, odpovídající značce č.1 (n_v = násobek zatížení v těžišti) [42].



Obr.18 – Fraktografická stopa značky č.1 (viz obr.17) na lomu podélníku trupu letounu L 39 MS [42].

Značky byly sestaveny z bloků dvou typů, které se liší počtem monotónních cyklů, které obsahují. Tyto bloky jsou v dalším textu (analogicky jako prvky Morseovy abecedy) označovány jako "tečka" (100 cyklů) a "čárka" (800 cyklů). Každá značka začíná třemi přetěžovacími cykly, jednotlivé bloky jsou ve značce odděleny jedním přetěžovacím cyklem. Základní série obsahuje 12 různých značek - viz tabulka, která je součástí obr.19. Na obr.17 je uvedeno schéma zatěžování odpovídající značce č.1, na obr.18 je fraktografický obraz této značky na snímku z řádkovacího elektronového mikroskopu.

Během únavové zkoušky letounu L 39 MS byla uvedená značkovací série aplikována čtyřikrát [42]. Příklad finálního výsledku fraktografické rekonstrukce ve formě dvourozměrného popisu časového průběhu porušování nosného průřezu je uveden na obr.19 (podrobněji viz např. [7]).



Obr.19 - Schéma 12 značek použitých při únavové zkoušce letounu L 39 MS. Fraktografická rekonstrukce průběhu porušování podélníku trupu [7].

5. ZÁVĚR

Předložená práce je zaměřena na problematiku komplexního výzkumu únavových lomů. Pro tento hybridní vědní obor, charakterizovaný syntézou poznatků lomové mechaniky, výsledků kvantitativní fraktografické analýzy a všech dalších informací o jevech probíhajících v porušovaných tělesech, jsme zavedli název *fraktologie*. Vzhledem ke složitosti problematiky predikce únavové životnosti reálných konstrukcí a jejich komponent je zřejmé, že hlavním zdrojem objektivních (a tedy v praxi aplikovatelných) informací je experimentální výzkum, tj. únavové zkoušky. Zkoušejí se jednoduchá tělesa, složitější modelové vzorky, reálné komponenty i celé konstrukce. Čím složitější je zkoušený objekt a použité zatěžovací spektrum, tím více se podmínky experimentu přibližují podmínkám provozu. Zároveň však rostou finanční náklady spojené s tímto experimentem. Je proto třeba, aby informační přínos (tj. objem i kvalita získaných dat) těchto experimentů byl co největší. K dosažení tohoto cíle může významnou měrou přispět fraktologie.

Některé otázky, řešené v této práci, patří svým charakterem spíše do oblasti základního výzkumu - studium vlivu vybraných vstupních faktorů na vznik a šíření únavových trhlin, vztah mezi roztečí striací a makroskopickou rychlostí šíření únavové trhliny, vymezení a detailní charakteristika dílčích etap šíření únavové trhliny na základě analýzy kvantitativních a kvalitativních změn, ke kterým postupně dochází v průběhu únavového procesu, vývoj metodiky rekonstrukce časového průběhu procesu šíření únavové trhliny na základě kvantitativních dat, získaných při fraktografické analýze únavových lomů apod. Při řešení naznačených problémů se ve většině případů vycházelo

z experimentálních dat, získaných při laboratorních únavových zkouškách geometricky jednoduchých těles.

Problematika, které jsou věnovány další odstavce tohoto spisu, patří do oblasti aplikovaného výzkumu. V těchto případech byla fraktologie použita pro řešení konkrétních problémů z vývojové a provozní praxe. Jsou zde uvedeny tři příklady, ilustrující možnosti použití metod fraktografické rekonstrukce časového průběhu při řešení otázek životnosti a spolehlivosti komponent letadlových konstrukcí.

Při únavových zkouškách reálných konstrukcí lze zpracováním a interpretací kvantifikovaného fraktografického nálezu získat důležité charakteristiky únavového procesu - např. počet zatěžovacích cyklů potřebný pro iniciaci, závislost délky trhliny či velikosti plochy porušeného nosného průřezu na sledované časové charakteristice zatěžovacího spektra, popis změn rychlosti a směru šíření únavových trhlin v závislosti na geometrii nosného průřezu porušované části, časovou souslednost vzniku a rozvoje jednotlivých trhlin v konstrukci včetně informací o případných interakcích mezi jednotlivými poruchami, popis vlivu konstrukčních či technologických změn, oprav, změn použitého materiálu na proces únavového porušování konstrukce apod.

LITERATURA

- [1] ANON. : Int. J. Fatigue, 5, 1983, p.176.
- [2] OHNAMI, M.: Fracture and Society. Tokyo, Ohmsha/IOS Press 1992.
- [3] NEDBAL,I.: Fraktografická analýza v komplexním přístupu ke studiu mezních stavů těles a konstrukcí. (Habilitační práce.) Praha 1979. ČVUT. FJFI.
- [4] ZEMANDL, M. JANDOŠ, F.: Hutnické listy, 1994, s.56.
- [5] FIDRANSKÝ,J.: Průkaz bezpečného života křídla cvičného letounu náhodným zatížením. (Kandidátská disertační práce.) Praha 1990. ČVUT. FSI.
- [6] KUNZ,J. NEDBAL,I. SIEGL,J.: Letecký zpravodaj, 3/2002, s.62.
- [7] NEDBAL,I. KUNZ,J. SIEGL,J.: Some Remarks on Fatigue Fracture Marking. In: Fatigue. Beijing Cradley Heath, HEP EMAS 1999, p.2373.
- [8] KUNZ,J. SIEGL,J.: Fractographic Marking of Fatigue Fracture of Aircraft Structure Parts. [Report V-KMAT-625/05.] Praha, ČVUT-FJFI-KMAT 2005.
- [9] KUNZ, J.: Aplikovaná lomová mechanika. Praha, Česká technika ČVUT 2005.
- [10] BROEK, D.: The Practical Use of Fracture Mechanics. Dordrecht, Kluwer 1988.
- [11] BLAKE, A.: Practical Fracture Mechanics in Design. New York, M. Dekker 1996.
- [12] KUNZ,J.: Kovové materiály, 20, 1982, s.301.
- [13] KUNZ,J.: Sledování vlivu strukturních nehomogenit a experimentálních podmínek na iniciaci a rozvoj únavových trhlin na tyčích z oceli 22K. [Výzkumná zpráva V-KMAT-63/79.] ČVUT-FJFI-KMAT 1979.
- [14] BUBENÍČEK,M. KUNZ,J.: Vliv periodicky se opakujícího přetěžování na šíření únavových trhlin v tělesech z hliníkové slitiny ČSN 42 4202. [Výzkumná zpráva V-KMAT-345/92.] Praha, ČVUT-FJFI-KMAT 1992.
- [15] ZUIDEMA, J. MANNESSE, M.: Engng Fracture Mech., 34, 1989, p.445.
- [16] KUNZ,J.: Vliv smykových okrajů na rychlost šíření únavové trhliny. In: Degradácia vlastností konštrukčných materiálov únavou. Žilina, Žilinská univerzita 2001, s.91.
- [17] NEDBAL, I. KUNZ, J.- SIEGL, J.: Kovové materiály, 23, 1985, s.725.
- [18] NEDBAL,I. KUNZ,J. SIEGL,J.: Fatigue Crack Growth in Austenitic Steel AISI 304L in PWR Primary Water at Room and Elevated Temperature. In: Environmental Degradation of Engineering Materials (Event No.264 of the EFC). LMP Université Bordeaux 1, 2003, CD-Rom.
- [19] KUNZ,J. NEDBAL,I. SIEGL,J.: Vliv vodního prostředí a zvýšené teploty na únavové porušování austenitické oceli. In: Degradácia vlastností konštrukčných materiálov. Žilina, Žilinská univerzita 2003, s.13.
- [20] KRASOWSKY, A.J. STEPANENKO, V.A.: Int. J. Fracture, 15, 1979, p.203.
- [21] FURUKAWA,K.: Mat. Sci. Engng, A285, 2000, p.80.
- [22] NEDBAL,I. SIEGL,J. KUNZ,J.: Relation Between Striation Spacing and Fatigue Crack Growth Rate in Al-Alloy Sheets. In: Advances in Fracture Research (Proc. ICF 7). Oxford, Pergamon Press 1989, p.3483.
- [23] KUNZ,J. et al.: Fractographic Remarks to Fatigue Crack Growth Rate. In: Fatigue 93. Cradley Heath, EMAS 1993, p.649.

- [24] KUNZ,J.: Materials Engineering, 10, 2003, p.9.
- [25] HERTZBERG, R.W.: Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. 2nd Ed. New York, John Wiley and Sons 1983.
- [26] WEI, R.P.: Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., 25, 2002, p.845.
- [27] ROVEN,H.J. et al.: Striations and the Fatigue Growth Mechanism in a Micro-Alloyed Steel. In: Fatigue '87. Cradley Heath, EMAS 1987, p.175.
- [28] NEDBAL,I. KUNZ,J. SIEGL,J.: Microfractographic Aspects of Fatigue Crack Growth in 7010 Aluminium Alloy. In: Fractography '97. IMR SAS 1997, p.264.
- [29] WANHILL, R.J.H.: Engng Fracture Mech., 30, 1988, p.233.
- [30] KOPŘIVA,P. KUNZ,J.: Statistical Processing of Experimental Data on Fatigue Crack Growth. In: CTU Seminar 94. Part C. CTU Prague 1994, p.129.
- [31] KUNZ,J. NEDBAL,I. SIEGL,J.: Synergie mechanismu tvorby striací s jinými mechanismy porušování při procesu šíření únavových trhlin. In: Fractography 2003. Košice, IMR SAS 2003, p.148.
- [32] YOKOBORI,T. SATO,K.: Engng Fracture Mech., 8, 1976, p.81.
- [33] NEDBAL,I. KUNZ,J. SIEGL,J.: Influence of Corrosion Environment and Stress Ratio on Fatigue Crack Growth in Stainless Steel 304 L. In: Fractography 2000. Košice, IMR SAS 2000, p.293.
- [34] AUGUSTIN,P. PÍŠTĚK,A.: Experimentální určení podkladů pro damage tolerance analýzu nosníku křídla s únavovými trhlinami ve stojině. In: Proc. EAN 2000 (38th Int. Conf. ESA). Třešť 2000, s.9.
- [35] KUNZ,J. SIEGL,J. NEDBAL,I. AUGUSTIN,P. PÍŠTĚK,A.: In: Proc. 24th ICAS 2004 (Yokohama). Optimage Ltd. 2004, 10 p., CD-Rom.
- [36] FOTH, J. SCHÜTZ, W.: Crack Propagation under Constant and Variable Stress Amplitudes: A Comparison of Calculations Based on the Striation Spacing and Tests. In: Fatigue Crack Topography. Sienna, NATO 1984, p.17.1.
- [37] NEDBAL,I. KUNZ,J. SIEGL,J.: Quantitative Fractography Possibilities and Applications in Aircraft Research. In: Basic Mechanisms in Fatigue of Metals. Amsterdam, Elsevier 1988, p.393.
- [38] NEDBAL, I. KUNZ, J. SIEGL, J.: Strojírenství, 38, 1988, s.669.
- [39] KUNZ,J. NEDBAL,I. SIEGL,J.: Application of Fractography in Full-Scale Tests of Aircraft Structure Parts. In: Fracture Behaviour and Design of Materials and Structures (Proc. ECF 8). Cradley Heath, EMAS 1990, p.1662.
- [40] HRKAL,K. RŮŽIČKA,M.: Zkouška doby života křídla letounu L 410 UVP - II. [Zkušební zpráva VZLÚ Z-2694/82.] Praha, VZLÚ 1982.
- [41] SIEGL,J. NEDBAL,I. KUNZ,J.: Fraktografická analýza únavových poruch II. křídla letounu L 410 UVP. [Výzkumná zpráva V-KMAT-147/84.] Praha, ČVUT-FJFI-KMAT 1984.
- [42] SIEGL,J. NEDBAL,I. KUNZ,J.: Fraktografická analýza levého podélníku trupu letounu L39 MS porušeného při únavové zkoušce. [Výzkumná zpráva V-KMAT-403/95.] Praha, ČVUT-FJFI-KMAT 1995.

Doc. Ing. Jiří Kunz, CSc.

CURRICULUM VITAE

Narozen:	3.6.1951 v Děčíně		
Vzdělání::	FJFI ČVUT v Praze (1970-1975)		
	Střední průmyslová škola strojní v Děčíně (1966-1970)		
Obor jmenování:	doc Fyzikální inženýrství (1998)		
	CSc. Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálů (1984) Ing. Fyzikální inženýrství (1975)		
Speciální kurzy:	<i>Metal Fatigue</i> –One-Week Course, University of Sheffield, 1991. <i>Základy pedagogiky vysoké školy</i> . Dvousemestrální kurz. Výzkumný ústav inženýrského studia ČVUT v Praze, 1986-1987 <i>Lomová mechanika a teorie spolehlivosti strojů a konstrukcí</i> . Čtyřsemestrální postgrad. kurz, FJFI ČVUT v Praze, 1976-1979.		
Zaměstnavatel:	FJFI ČVUT v Praze, Katedra materiálů (1976 – dosud)		
Pedagogická	Od r.1988 na FJFI ČVUT v Praze (Technická mechanika,		
činnost	<i>Dynamika</i> , <i>Lomová mechanika</i> apod.). V r. 1995-2000 na FD ČVUT v Děčíně (<i>Mechanika</i>). Vedení studentských projektů, diplomových, kandidátských a doktorských disertačních prácí.		
Oblasti vědecko-	Únava konstrukčních materiálů, aplikovaná lomová mechanika.		
výzkum. činnosti:	analýza poruch, fraktografie, zkoušení materiálů apod.		
Publikace:	Autor, resp. spoluautor 80 příspěvků v odborných časopisech, monografiích a sbornících, 70 výzkumných zpráv pro tuzemské a zahraniční partnery, tří vysokoškolských skript (cena rektora ČVUT). Autor 38 oponentských či lektorských posudků článků, projektů, diplomových, disertačních, habilitačních prací apod.		
Odkazy (citace): prací	215 citací prací, na kterých jsem se autorsky podílel, v odborné literatuře - z toho 116 v zahraničí.		
Členství a funkce:	Člen <i>VR FJFI ČVUT v Praze</i> (1997-2000, 2006-dosud), Člen <i>Rady programů MPO ČR "Rozvoj center špičkových průmyslových výrobků a technologií</i> " (1998-2001), <i>"Projektová konsorcia</i> " (2001-2003), <i>"Pokrok"</i> (2003-dosud), Člen Editorial Board , <i>"Materials Engineering</i> "(2003-dosud), Předseda správní rady nadace <i>Academica</i> (1996-1998), Member of <i>European Structural Integrity Society</i> (2005–dosud), Člen komise pro obhajobu doktorských prací na FJFI ČVUT v Praze a na FSI VUT v Brně, Předseda, resp. místopředseda Akademického senátu FJFI ČVUT v Praze (1993-1995), Proděkan FJFI ČVUT v Praze (1995-2000) Vedoucí katedry materiálů FJFI ČVUT v Praze (2006-dosud)		

KONCEPCE VĚDECKÉ PRÁCE A VÝUKY V DANÉM OBORU

Další výzkum fraktografických aspektů procesu únavového porušování konstrukčních slitin je v současné době na katedře materiálů FJFI ČVUT v Praze realizován jednak v rámci výzkumných záměrů MSM6840770021 "*Diagnostika materiálů*" a MSMT6840770020 "*Bezpečnost jaderných zařízení*", jednak ve spolupráci s průmyslovými podniky, výzkumnými ústavy a dalšími institucemi při řešení konkrétních problémů v praxi. Do vědecko-výzkumných aktivit katedry jsou v rámci samostatných prací či projektů zapojeni studenti bakalářského, magisterského a doktorského studia zaměření "*Stavba a vlastnosti materiálů*". Nově získané poznatky jsou průběžně presentovány na konferencích u nás i v zahraničí, publikovány v odborných časopisech a začleňovány do sylabů přednášek - zejména předmětů "*Lomová mechanika*" a "*Experimentální metody*" v magisterském studijním programu a "*Aplikovaná lomová mechanika*" a "*Úvod do fraktografie*" v doktorském studijním programu.

Experimentální možnosti katedry materiálů v oblasti výzkumu degradačních procesů byly výrazně rozšířeny vybudováním společného fraktografického pracoviště s UJP a.s. Praha. Toto pracoviště je vybaveno zejména kvalitními přístroji pro řádkovací elektronovou mikroskopii. Dalším významným zdrojem poznatků o šíření únavových trhlin, kterého se na katedře materiálů v širší míře využívá, je matematické modelování procesů probíhajících v tělesech vystavených časově proměnnému zatěžování a jejich počítačová simulace pomocí metody konečných prvků.