

SHORT CRACK GROWTH IN FERRITIC-PEARLITIC-BAINITIC STEEL

J. Polák*

Summary: *The initiation and the growth of short cracks were studied in ferritic-pearlitic-bainitic steel. Short cracks initiate preferably in persistent slip markings that appear in areas of proeutectoid ferrite embedded in the matrix of tempered bainite. The kinetics of short crack was measured in cycling with constant plastic strain amplitudes. Exponential crack growth was observed. Crack growth coefficient was found to be a function of plastic strain amplitude. The comparison of the short crack growth kinetics with fatigue life curve in the form of Coffin-Manson law allows determining the parameters of the short crack growth law from the low cycle fatigue experiments.*

1. Úvod

Únavová životnost materiálů a součástí strojů a zařízení v mnoha průmyslových oblastech je důležitou součástí návrhu těchto struktur. Zajištění bezpečnosti průmyslových zařízení po celou dobu jejich plánované životnosti vyžaduje spolehlivé metody určení únavové pevnosti a životnosti. Vzhledem k rozmanitosti materiálů, charakteru zatěžování i provozních podmínek, z nichž nejdůležitější jsou teplota a okolní prostředí, není tato úloha jednoduchá.

Pro predikci únavové životnosti existuje řada procedur a doporučení, které jsou průběžně inovovány. Znamé jsou procedury API 597, BS7910/PD 6493, R6, doporučení ASME a SINTAP a doporučení evropského projektu FITNET (Zerbst et al., 2003). Tato doporučení a procedury se snaží vytvořit standardní postupy k odhadu a zabezpečení životnosti částí strojů, zařízení a často i celých konstrukcí. Při jejich inovaci jsou obvykle integrovány nové poznatky o kumulaci poškození při monotónním i cyklickém namáhání materiálů. Tento typ poznatků vyplývá ze základního výzkumu chování materiálů podrobených různým typům zatěžování za definovaných okolních podmínek.

Existuje řada postupů pro predikci únavové životnosti materiálů a strojních dílů avšak jak postupy založené na požití křivek životnosti, tak postupy založené na aplikaci integrace rychlostí dlouhých trhlin vedou často k hodnotám rozdílným od experimentů. Východiskem z této situace je podrobnější studium procesu poškození při cyklickém zatěžování, zejména studium iniciace únavových trhlin a vyšetřování jejich počátečního růstu (Suresh & Ritchie, 1984, Polák, 2003) neboť iniciace a stadium šíření krátkých trhlin často určují únavovou životnost.

* Prof. RNDr. Jaroslav Polák, DrSc., Ústav fyziky materiálů AVČR v.v.i.; Žižkova 22, 616 62 Brno; tel.: +420.532 290 366, fax: +420.541 218 657; e-mail: polak@ipm.cz

Cílem této práce je studovat chování feriticko-perliticko-bainitické ocele používané v energetice při cyklickém zatěžování s cílem podrobněji kvantifikovat vývoj jejího únavového poškození zejména studiem iniciace a šíření krátkých únavových trhlin a přispět tak ke zlepšení postupů vedoucích k odhadu únavové životnosti kovových materiálů.

2. Únavové poškození materiálů

Působením časově proměnných sil na části strojů a zařízení vznikají v materiálu proměnná napětí a ta indukují proměnné deformace. Při podrobném studiu únavového procesu krystalických materiálů bylo zjištěno, že rozhodující veličinou pro vznik únavového poškození je cyklická plastická deformace.

Průběh poškození materiálů byl historicky studován při zatěžování konstantními amplitudami napětí. Výsledkem určení životnosti je známá Wöhlerova křivka, tj. závislost amplitudy napětí na počtu cyklů do lomu. V padesátých letech minulého století byly zavedeny zkoušky při konstantních amplitudách celkové deformace a později při konstantních amplitudách plastické deformace. Výsledkem určení životnosti při těchto zkouškách je Mansonova-Coffinova křivka životnosti, tj. závislost amplitudy plastické deformace, popř. ustálené amplitudy plastické deformace na počtu cyklů do lomu.

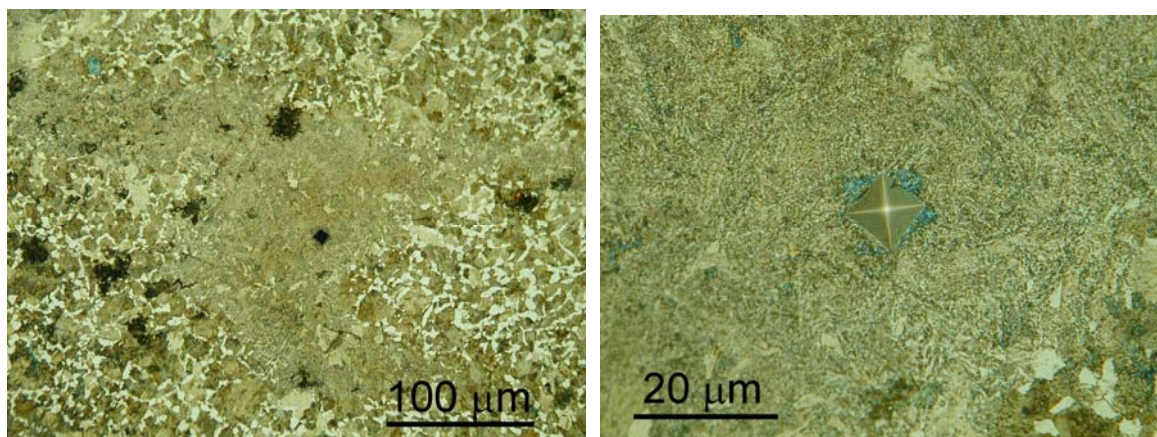
Při jednotlivých režimech zatěžování dochází na počátku zatěžování obvykle k výrazné změně mechanických vlastností projevujících se změnou tvaru hysterezní smyčky, tj. dochází k cyklickému zpevnění nebo k cyklickému změkčení. Charakteristickým rysem cyklického zatěžování je lokalizace cyklické plastické deformace a vznik perzistentních skluzových pásů (PSP) uvnitř materiálu a perzistentních skluzových stop (PSS) v místech, kde PSP vycházejí na povrch krystalu. Povrchem krystalu je možné rozumět i eventuální vnitřní povrchy. PSS sestávají z extruzí a intruzí a zejména intruze představují výrazný koncentrátor napětí a deformace. Obvykle právě intruze jsou místa, odkud se iniciují únavové trhliny.

Únavová trhlina se iniciuje obvykle v jednom zrně materiálu, které má příznivou orientaci vzhledem aplikovanému vnějšímu napětí. Je iniciována řada únavových trhlin a jejich hustota roste s aplikovanou amplitudou plastické deformace. Pod vlivem cyklické plastické deformace a cyklického napětí dochází k růstu trhlin, jejich vzájemné interakci a postupnému vzniku makroskopické trhliny. Šířením makroskopické trhliny dochází při dosažení kritického součinitele intenzity napětí k finálnímu lomu tělesa.

3. Experimenty

Pro studium únavového poškození, iniciaci a šíření krátkých trhlin byla zhotovena zkušební válcová tělesa. Tělesa byla odebrána z hmotného výkovku o velikosti $500 \times 500 \times 2800 \text{ mm}^3$ oceli 42CrMo4 odlitým procesem sekundární vakuové metalurgie a vykovaném v podniku Žďas a.s. Chemické složení materiálu ve váhových procentech je: 0,42 C, 0,70 Mn, 0,29 Si, 0,01 P, 0,001S, 1,08 Cr, 0,24 Mo a zbytek Fe. Po tepelném zpracování spočívajícím v ohřevu na $870 \text{ }^\circ\text{C}$ a následném rychlém ochlazení a popuštění po dobu 11 hodin na teplotě $680 \text{ }^\circ\text{C}$ byla struktura materiálu v blízkosti povrchu převážně popuštěná bainitická a blízko středu výkovku převážně pouštěná feriticko-perlitická. Zkušební tělesa byla odebrána z výkovku asi uprostřed mezi osou výkovku a povrchem a měla smíšenou strukturu feriticko-perlitickou s ostrovy popuštěného bainitu. Příklad této struktury ukazuje obr. 1, kde je v oblasti ostrovu bainitu vidět mikropích pro měření tvrdosti.

Zkušební válcová tělesa měla průměr měrné části 8 mm a délku 12 mm. Na těchto tělesech byla měřena cyklická plastická odezva a únavová životnost. Pro studium iniciace a šíření krátkých trhlin byl na několika tělesech vybroušen mělký vrub uprostřed tělesa broušením válcovou plochou o průměru 60 mm kolmo k ose vzorku do hloubky 0,4 mm. Tím vznikla ploška, která byla poté mechanicky a elektrolyticky leštěna a opatřena jemným rastrem k identifikaci polohy trhlin. V mělkém vrubu vznikla koncentrace napětí a deformace charakterizovaná teoretickým součinitelem K_t , který byl odhadnut na 1,05 (Peterson, 1974). Díky koncentraci napětí a deformace v mělkém vrubu magistrální trhlina vznikala převážně v této oblasti.



Obr. 1 Mikrostruktura studované oceli, a) oblasti pouštěného bainitu a feritu s perlitem, b) detail struktury popuštěného bainitu s ostrůvky proeutoidního feritu.

Zkušební tělesa byla cyklicky namáhána v elektrohydraulickém pulsátoru MTS 880. Deformace byla měřena a řízena snímačem podélné deformace na měrné délce 12 mm. Byla řízena deformace zkušební tělesa s rychlostí $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ byla udržována konstantní amplituda plastické deformace. U zkušebních těles, jejichž životnost byla vyšší než 10 000 cyklů, za účelem zrychlení experimentu byl po uplynutí 10 000 cyklů průběh deformace v cyklu sinusový s frekvencí 5 Hz. Pouze záznam hysterezních smyček probíhal s původní konstantní rychlostí deformace. Ze zaznamenaných hysterezních smyček byla vyhodnocována amplituda napětí a amplituda plastické deformace.

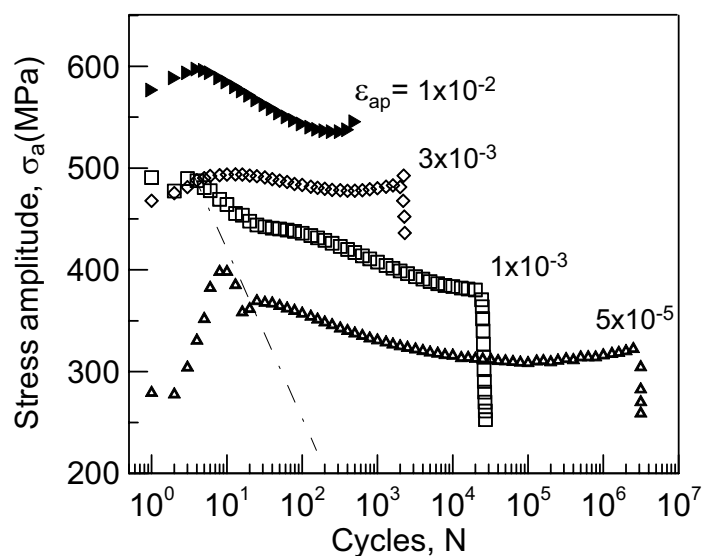
Tělesa s mělkým vrubem byla pozorována přímo v zatěžovacím stroji pomocí mikroskopu QUESTAR s dlouhým ohniskem a snímky trhlin byly zaznamenávány digitální kamerou do paměti počítače. U vznikajících a šířících se trhlin byla vyhodnocována délka trhliny projektovaná na kolmici k ose zatěžování. Poněvadž trhliny měly krátce po iniciaci tvar blízký půlkruhu, bylo možné velikost trhliny charakterizovat jejím poloměrem, rovným poloviční povrchové délce trhliny. U velmi krátkých, právě iniciovaných trhlin, obvykle v rámci jednoho zrna, nebylo pomocí světelného mikroskopu možné odlišit, zda se jedná o perzistentní skluzové stopy nebo zda již z těchto perzistentních skluzových stop byly iniciovány únavové trhliny. Jakmile však došlo k růstu, jednalo se vždy jednoznačně o trhlínu.

Iniciace a počáteční šíření trhlin bylo na některých tělesech sledováno přerušením cyklování, vyjmutím zkušební tělesa ze zatěžovacího stroje a studiem jeho povrchu v rastrovacím elektronovém mikroskopu.

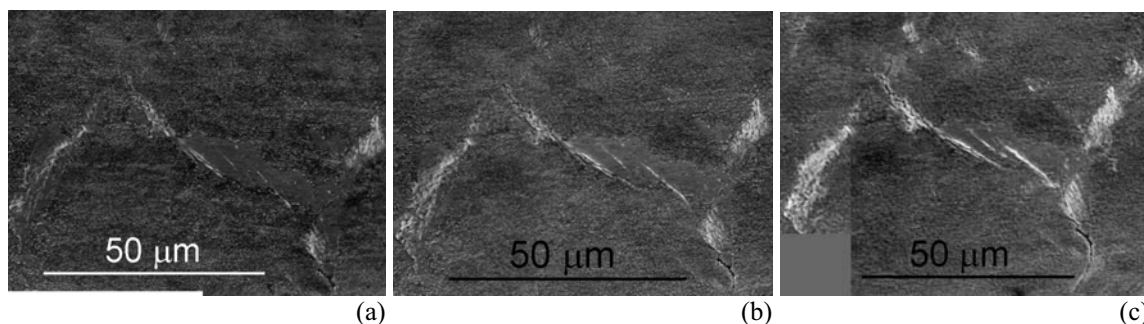
4. Výsledky

4.1 Cyklické plastické chování

Cyklickou plastickou reakci materiálu na symetrickou deformaci s konstantními amplitudami plastické deformace ukazuje obr. 2. Jsou zde vyneseny křivky cyklického zpevnění/změkčení pro čtyři amplitudy plastické deformace. Pro nejnižší amplitudu plastické deformace je počáteční růst amplitudy napětí (asi do 10 cyklů) důsledkem postupného dosažení zadané amplitudy plastické deformace. Je zřejmé, že s výjimkou krátkého počátečního zpevnění dochází během únavového života k cyklickému změkčení. Změkčení je nejvýraznější pro střední amplitudy plastické deformace. U nejnižší amplitudy plastické deformace nastává po cyklickém změkčení dokonce mírné dlouhodobé cyklické zpevnění.



Obr. 2 Křivky cyklického zpevnění oceli pro různé amplitudy plastické deformace



Obr. 3 Iniclace a počáteční růst krátké trhliny z perzistentních skluzových pásů v proeutektoidním feritu

4.2 Iniclace trhlin

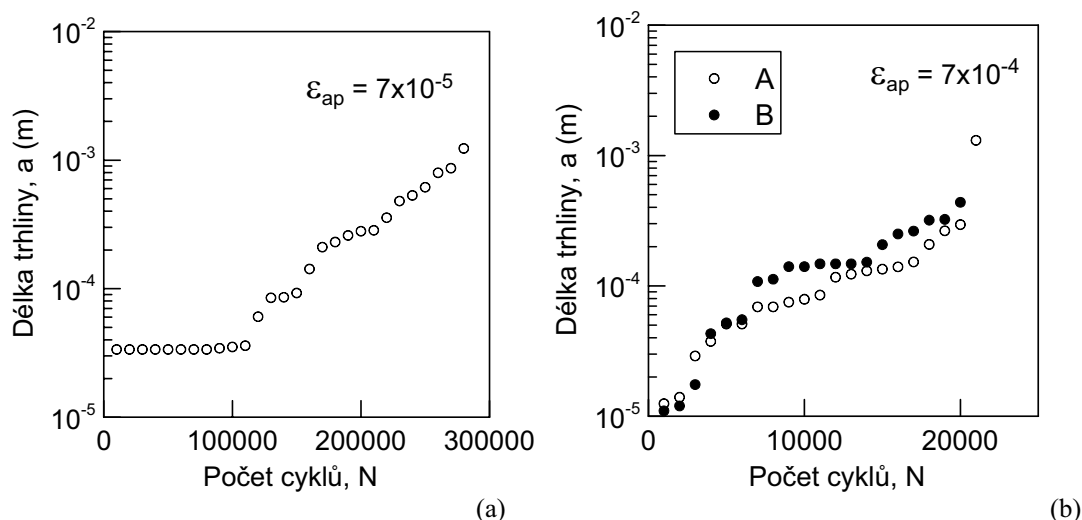
V průběhu únavového života dochází k vytváření povrchového reliéfu v oblastech nejměkčí fáze studované oceli. Obr. 3 ukazuje tři stadia vývoje povrchového reliéfu vzorku cyklicky deformovaného s konstantní amplitudou plastické deformace 1×10^{-3} . Na obr. 3a je snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu po 2000 cyklech. Je zde struktura popuštěného bainitu, v němž se vyskytují zrna feritu. Právě ve feritu, který je nejměkčí složkou materiálu,

dochází k lokální cyklické deformaci. Opakovanou cyklickou deformací vznikají perzistentní skluzové stopy. V tomto případě jsou zřejmé extruze a v jednom místě paralelně s extruzí je vidět intruze, nebo již iniciovaná malá únavová trhlinka. Tato trhlinka svírá s osou zatěžování úhel asi 45° . Také v dolní části obrázku je patrná další malá únavová trhlinka, spíše kolmo k ose zatěžování. Ferritická zrna jsou deformována lokálně, tj. reliéf se vytváří převážně na hranici s popuštěnou bainitickou maticí.

Po uplynutí 4000 cyklů (obr. 3b) se reliéf v zrnech feritu stává intenzivnější, obě trhlinky jsou zřetelnější a zvětšuje se jejich povrchová délka. Obr. 3c ukazuje stejnou oblast po 10 000 cyklech. Je zřejmé, že došlo k dalšímu růstu obou trhlín, které se již vzájemně propojily. Větší část iniciované trhlinky je skloněna pod úhlem 45° , avšak další růst trhlinky pokračuje již ve směru kolmém na osu zatěžování.

4.3 Růst krátkých trhlín

Růst krátkých trhlín byl sledován při zatěžování s konstantními amplitudami deformace. V zatěžovaných tělesech se v oblasti mělkého vrubu v průběhu únavového života postupně iniciovalo větší množství trhlín. Jejich hustota rostla s aplikovanou hodnotou amplitudy plastické deformace. Růst většiny trhlín se však zastavil a typicky rostla jen jedna, magistrální trhlinka, která vedla k lomu.

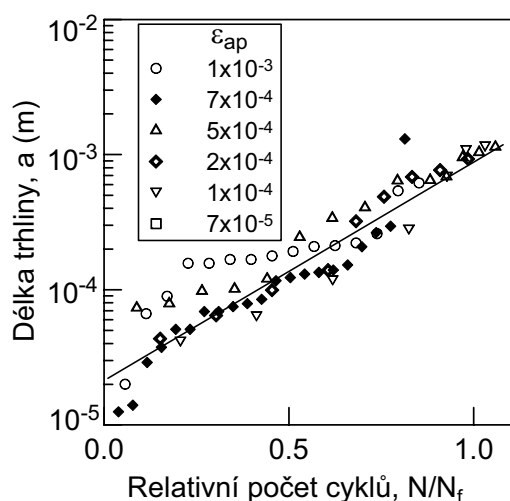


Obr. 4 Růst krátkých únavových trhlín při dvou amplitudách plastické deformace
a) $\epsilon_{ap} = 7 \times 10^{-5}$, b) $\epsilon_{ap} = 7 \times 10^{-4}$

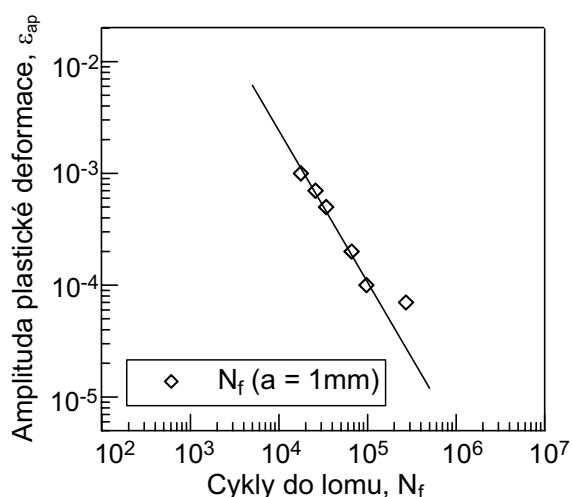
Obr. 4 ukazuje příklady růstu únavových trhlín pro dvě různé amplitudy plastické deformace. Délka trhliny je vynesena v závislosti na počtu únavových cyklů v semilogaritmickém znázornění. Pro nízkou amplitudu plastické deformace (obr. 4a) je zřejmé, že velmi brzy vznikly perzistentní skluzové stopy, ve kterých vznikla únavová trhlinka, a kolem 100 000 cyklů došlo k jejímu šíření. Logaritmus délky trhliny je pak úměrný počtu aplikovaných cyklů. U vzorku zatěžovaného amplitudou plastické deformace 7×10^{-4} (obr. 4b) se ve velmi raném stadiu života iniciovaly ve značné vzdálenosti od sebe dvě trhlinky, které rostly přibližně stejnou rychlostí. K lomu vedla pouze jedna z nich. Růst trhlín byl ovlivňován spojováním hlavních trhlín s iniciovanými trhlínami, které se nacházely v dráze hlavních trhlín. Spojení s hlavní trhlinou vedlo k poskoku povrchové délky trhliny. Poněvadž trhlinka musela růst i

směrem dovnitř vzorku, její rychlost, odvozená z povrchové rychlosti, zdánlivě poklesla. Zanedbáme-li tyto lokální variace rychlosti, je zřejmé, že i v tomto případě můžeme růst obou trhlin charakterizovat lineární závislostí logaritmu délky trhliny na počtu cyklů.

Jakmile trhlina dosáhla povrchové délky 2 mm (tj. $a = 1$ mm), došlo k velmi rychlému růstu a počet cyklů do lomu se příliš nelišil od počtu cyklů k dosažení délky trhliny 1 mm, zejména v případě, kdyby od tohoto okamžiku byla udržována konstantní amplituda napětí. Proto jsme definovali počet cyklů do lomu N_f jako počet cyklů nutných k dosažení délky trhliny 1 mm. V obr. 5 jsme pak vynesli délky magistrálních trhlin ze zkoušek s různými amplitudami plastické deformace na relativním počtu únavových cyklů, tj. počtu cyklů dělený příslušným počtem cyklů do lomu N/N_f . Z obrázku je patrné, že ve vyšetřovaném intervalu amplitud plastické deformace a jim odpovídajících životností je únavový život vyšetřované oceli převážně dán etapou šíření krátkých trhlin.



Obr. 5 Délka trhlin vs. relativní počet cyklů



Obr. 6 Mansonova-Coffinova křivka životnosti těles s mělkým vrubem

Počet cyklů do lomu N_f jsme vynesli v závislosti na amplitudě plastické deformace v obr. 6. Získanými experimentálními body jsme metodou nejmenších čtverců proložili mocninnou závislost, které v obr. 5 odpovídá zakreslená přímka. Z parametrů mocninné závislosti jsme určili parametry Mansonova-Coffinova zákona, který je obvykle uváděn ve tvaru

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (1)$$

Součinitel únavové pevnosti $\varepsilon'_f = 142$ a exponent únavové tažnosti $c = -1,16$.

5. Diskuse

Studium iniciace a šíření krátkých trhlin ve feriticko-perliticko-bainitické oceli ukazuje na základní úlohu amplitudy cyklické plastické deformace nejen pro únavovou životnost, ale zejména pro kinetiku kumulaci únavového poškození. Při výpočtu únavové životnosti konstrukcí i součástí strojů a zařízení nelze často v důsledku přítomnosti gradientu napětí a deformace použít přímo křivky únavové životnosti hladkých vzorků materiálu. Také aplikace

lineární lomové mechaniky a závislostí rychlostí šíření dlouhých trhlin na součiniteli intenzity napětí nevede ke správné predikci únavové životnosti. Je to důsledkem toho, že kinetiku růstu krátkých trhlin nelze popsat pomocí lineární lomové mechaniky.

Experimentálním studiem únavového poškození těles s velmi mělkým vrubem bylo zjištěno, že podstatná část únavového života je dána etapou šíření krátkých trhlin. Trhliny se iniciují v perzistentních skluzových pásech, které se na povrchu materiálu objevují jako perzistentní skluzové stopy. V materiálu s heterogenní strukturou se objevují v oblastech výskytu nejměkčí fáze, tj. v našem případě v zrnech proeutektoidního feritu. Kinetika růstu krátkých trhlin odpovídá exponenciálnímu zákonu, tj. rychlost šíření krátké trhliny můžeme psát ve tvaru

$$\frac{da}{dN} = k_g a \quad (2)$$

kde koeficient růstu trhliny k_g je roven přírůstku trhliny za jeden cyklus. Tento zákon šíření krátké trhliny platí od iniciace trhliny do dosažení finální délky únavové trhliny a_f . Abychom mohli jednodušeji přiřadit koeficienty růstu trhliny únavové životnosti, nahradíme krátkou etapu iniciace únavové trhliny etapou růstu trhliny z fiktivní počáteční délky trhliny a_i přítomné již před zahájením cyklování do skutečné délky iniciované trhliny podle zákona (2). V obr. 5 této konstrukci odpovídá extrapolace proložené přímkou až do 0 cyklů. Takto určíme charakteristickou fiktivní počáteční délku únavové trhliny a_i pro daný materiál. Z obr. 5 dostáváme $a_i = 2,1 \times 10^{-5}$ m.

Lineární závislost rychlosti šíření krátkých únavových trhlin na délce únavové trhliny byla zjištěna u uhlíkových ocelí (Nishitani et al., 1992), duplexní oceli (Polák & Zezulka 2005) i řady materiálů používaných pro konstrukci letadel (Molent et al., 2006).

Integrací vztahu (2) od fiktivní počáteční délky únavové trhliny a_i ($N = 0$) po finální délku a_f ($N = N_f$) dostáváme exponenciální zákon růstu během únavového života ve tvaru

$$a = a_i \exp(k_g N) \quad (3)$$

Pro $a = a_f$ platí

$$a_f = a_i \exp(k_g N_f) \quad (4)$$

Koeficient růstu trhliny k_g lze tedy určit z únavové životnosti N_f podle vztahu

$$k_g = \frac{1}{N_f} \ln \left(\frac{a_f}{a_i} \right) \quad (5)$$

Únavovou životnost materiálů určujeme v dnešní době již standardně zkouškami nízkocyklové únavy (Polák, 1991), které jsou mnohem méně náročné než pozorování krátkých trhlin a měření jejich kinetiky. V řadě případů lze životnost jako funkci amplitudy plastické deformace určovat i ve vysokocyklové oblasti.

Zákon šíření krátkých trhlin v diferenciálním tvaru (rovnice (2) spolu se závislostí koeficientu k_g na amplitudě plastické deformace) můžeme použít ke zpřesnění postupu predikce únavové životnosti vrubovaných těles. V případě všeobecné plasticity v oblastech vrubu, kdy nelze aplikovat zákony šíření dlouhých trhlin, můžeme analyticky nebo metodou konečných prvků určit lokální cyklická napětí a deformace, popř. amplitudy plastické deformace. Aplikací vztahů (2) a (5) lze počítat lokální rychlost šíření krátké trhliny. Integrací zjištěné rychlosti trhlin pak můžeme předpovědět únavovou životnost. V oblasti růstu krátkých trhlin aplikuje-

me vztah (2) spolu s parametry určenými za zkoušek nízkocyklové únavy. V oblasti růstu dlouhých trhlin lze uplatnit lomově mechanický přístup založený na závislosti rychlosti šíření únavové trhliny na rozkmitu součinitele intenzity napětí.

6. Poděkování

Tato práce byla vytvořena s podporou výzkumného záměru No. AV0Z 20410507 AV ČR a grantu č. 101/07/1500 GAČR.

7. Literatura

- Molent, L, Jones, R., Barter, S. & Pitt, S. (2006) Recent developments in fatigue crack growth assessment. *Int. J. Fatigue* 28, pp. 1759-1768.
- Nisitani, H, Goto, M & Kawagoishi, N. (1992) A small-crack growth law and its related phenomena. *Engng Fract. Mech.* 41, 4, pp. 499-513.
- Peterson, R. E. (1974) *Stress Concentration Factors*, John Wiley, New York.
- Polák J. (1991) *Cyclic Plasticity and Low Cycle Fatigue Life of Metals*. Academia-Elsevier, Praha-Amsterdam.
- Polák, J. (2003) Cyclic Deformation, Crack Initiation, and Low Cycle Fatigue, in: *Comprehensive Structural Integrity*, (I. Milne, R.O. Ritchie & B. Karahaloo, eds.), Vol. 4, Elsevier, Amsterdam, pp. 1-39.
- Polák, J. & Zezulka, P. (2005) Short crack growth and fatigue life in austenitic-ferritic duplex stainless steel. *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* 28, pp. 923-935.
- Suresh, S. & Ritchie, R.O. (1984) Propagation of short fatigue cracks. *Int. Metall. Rev.* 29, pp. 445-476.
- Zerbst, U., Schwalbe, K.-H. & Ainsworth, R.A. (2003) An Overview of Failure Assessment Methods in Codes and Standards, in: *Comprehensive Structural Integrity*, (I. Milne, R.O. Ritchie & B. Karahaloo, eds.), Vol. 7, Chapter 7.01, Elsevier, Amsterdam.