

Experimentální Analýza Napětí 2007

VERIFICATION OF FE MODEL OF FATIGUE CRACK PROPAGATION UNDER MIXED MODE CONDITIONS

VERIFIKACE MKP MODELU ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY V PODMÍNKÁCH KOMBINOVANÉHO NAMÁHÁNÍ

Josef Jurenka,¹ Miroslav Španiel², Jiří Kuželka³

Abstract: V příspěvku jsou prezentovány výsledky experimentálního měření šíření únavové trhliny v modifikovaném zkušebním CT v vzorku. Měření bylo prováděno na hydraulickém zkušebním stroji. Růst trhliny byl monitorován pomocí digitální kamery s mikroskopickou sondou s velkým rozlišením. Vyhodnocení chování trhliny bylo provedeno na základě sekvence statických snímků trhliny pořízených vždy po několika tisících cyklech.

Takto získaná data byla použita pro verifikaci algoritmů, které byly vytvořeny pro simulaci růstu trhlín pomocí MKP výpočtů. Z porovnání numerických a experimentálních dat vyplývá, že použité přístupy jsou vhodné pro simulace růstu únavových trhlín a mohou být zobecňovány pro potřeby konkrétní problematiky.

Keywords: crack growth observation, numerical simulation

1. Úvod

Šíření únavových trhlín materiálem při cyklickém zatěžování je z hlediska fyzikální podstaty velmi složitý proces spočívající v cyklickém otupování ostrého únavové čela trhliny plastickou deformací ve směru skluzových rovin při zatížení a následné opětné zaostření při odlehčení. Výsledkem je skokový růst trhliny. Díky složitému degradačnímu procesu je nezbytné pro matematický popis chování trhlín použití empirických vzorců (např. Parisův zákon), které vycházejí z experimentálních zkoušek. Jejich výsledky pak silně závisí na vlastnostech materiálu, okrajových a okolních podmínkách. Z těchto důvodů je použití těchto vztahů při predikci únavového šíření trhlín vždy vázáno na experimentální zkoušky, které modely šíření trhliny verifikují pro konkrétní použití.

Na pracovišti Fakulty strojní je vyvíjen MKP model pro provádění simulací růstu únavové trhliny ve 2D tělesech obecného tvaru a zatížení. Součástí těchto modelů je jednak Parisův vztah pro výpočet rychlosti šíření trhliny, ale také algoritmus pro určování směru šíření založený na výpočtu lomových kritérií. Nezbytnou podmínkou použitelnosti MKP modelu je jeho verifikace vzhledem k predikci rychlosti i směru růstu trhlín.

¹ Ing. Josef Jurenka, ČVUT v Praze, Ústav mechaniky, Fakulta strojní, Technická 4, 166 07 Praha 6 tel.: +420 224352527, e-mail: josef.jurenka@fs.cvut.cz

² Ing. Miroslav Španiel, CSc, ČVUT v Praze, Ústav mechaniky, Fakulta strojní, Technická 4, 166 07 Praha 6 tel.: +420 224352561, e-mail: miroslav.spaniel@fs.cvut.cz

³ Ing. Jiří Kuželka, ČVUT v Praze, Ústav mechaniky, Fakulta strojní, Technická 4, 166 07 Praha 6 tel.: +420 224352519, e-mail: jiri.kuzelka@fs.cvut.cz

2. Experimentální zkoušky

Cílem experimentálních zkoušek prováděných v laboratořích ČVUT je získání vhodných dat pro verifikaci numerického modelu šíření únavové trhliny. Zkoušky lze rozdělit na:

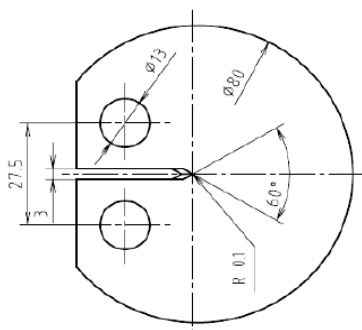
- Zkoušky pro verifikaci rychlosti růstu.
- Zkoušky pro verifikaci směru růstu.

2.1 Zkušební zařízení

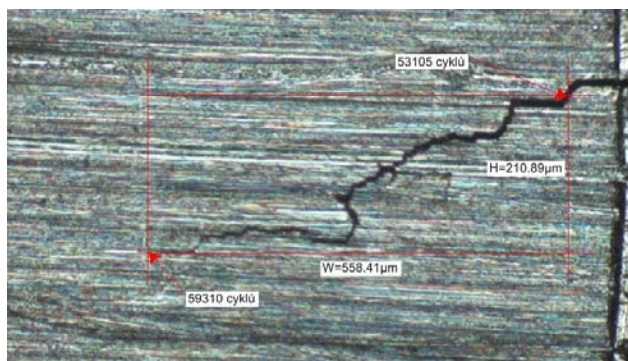
Základním zkušebním tělesem pro verifikaci rychlosti růstu byl modifikovaný CT vzorek (Obr.1), pro verifikaci směru šíření trhliny byl tento CT vzorek opatřen kruhovými otvory v blízkosti iniciačního vrubu, které působily jako koncentrátoři napětí a tím vyvolaly změnu směru šíření trhlín.

Zatěžování zkušebních těles bylo prováděno na hydraulickém trhacím stroji Heckect UFP 400 s frekvencí 5 Hz. Asymetrie zátěžného spektra R se blížila nule a hodnota amplitudy rozkmitu zatěžující síly byla volena dle délky trhliny tak, aby bylo dosažena vhodná rychlost růstu.

Chování trhliny během experimentu bylo monitorováno pomocí digitální kamery a mikroskopického objektivu s velkým zvětšením (Obr.2). Ke sběru a prvotnímu zpracování fotografií (Obr.3,5) byl využit PC se softwarem LuciaNet. Pozorování růstu trhliny bylo založeno na snímání pozice čela trhliny na povrchu vzorku v intervalech několika tisíců cyklů. Vyhodnocení průběhu zkoušky (rekonstrukce růstu trhliny) bylo provedeno na základě sekvence snímků trhliny, přičemž velikost přírůstku trhliny mezi jednotlivými expozicemi byla určena ze znalosti zvětšení mikroskopického objektivu kamery.



Obr.1: CT specimen.



Obr.3: Snímek čela trhliny - LuciaNet



Obr.2: Digitální kamera s mikroskopickou sondou.

2.2 Výsledky zkoušek

Sekvence snímků růstu přímé trhliny ve standardním CT vzorku byly použity pro stanovení parametrů jednoduchého Parisova vztahu. Vyhodnocení získaných dat (naměřených růstových křivek) bylo provedeno pomocí sečné metody, kdy střední délce trhliny,

$\bar{a}_i = \frac{a_i + a_{i+1}}{2}$, je přiřazena rychlost šíření, $\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i}$, přičemž hodnota rozkmitu faktoru

intenzity napětí ΔK odpovídající střední délce trhliny byla určena jako $\Delta K = \frac{1}{2}(\Delta K_i + \Delta K_{i+1})$.

Vypočtená rychlost šíření da/dN byla vynesena v závislosti na rozkmitu faktoru napětí ΔK v logaritmických souřadnicích. Získané body byly proloženy přímkou danou rovnicí (Obr.4):

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \Rightarrow \log\left(\frac{da}{dN}\right) = m \log(\Delta K) + \log(C) \Leftrightarrow y = ax + b \quad (1)$$

Porovnáním výše uvedených rovnic přímek lze získat hodnotu koeficientu C a exponentu m Parisova vztahu:

$$C = 1.517 \cdot 10^{-11} \text{ m/cyklus}, m = 2.48 \Rightarrow \frac{da}{dN} = 1.517 \cdot 10^{-11} \Delta K^{2.48} \quad (2)$$

Směr šíření trhliny byl sledován na vzorcích s dodatečným otvory. Vyhodnocení spočívalo především v určení polohy čela trhliny v průběhu zkoušky. Příklad sekvence snímků zachycující růst trhliny z iniciačního vrubu k otvoru je vidět na Obr.5.

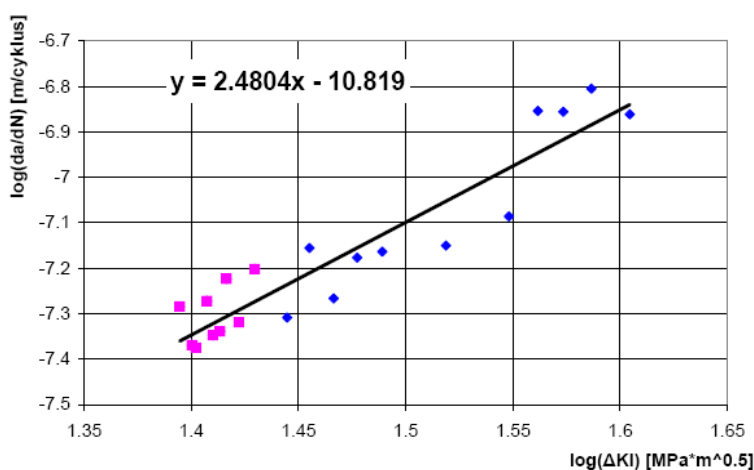
3. Numerické simulace

3.1 Numerický model

Základem MKP modelování je skript vytvořený v programovacím jazyku Python. Tento skript zajišťuje automatickou tvorbu MKP modelu, spouštění a vyhodnocení výpočtu a modifikaci původního MKP modelu v oblasti šířící se trhliny. Veškeré výpočty jsou prováděny v programu ABAQUS.

Simulace růstu trhlín byly prováděny pro zkoušené CT vzorky a byla vyhodnocována shoda s experimentem. Při simulacích byla rychlost růstu

trhliny určována pomocí jak jednoduchého Parisova vztahu (2), tak i modifikovaného [3] (3) s ohledem na vliv T-napětí na čele trhliny. Směr šíření trhliny byl určován jednak podle kritéria maximálního tangenciálního napětí a jednak podle modifikovaného kritéria, které uvažuje vliv T-napětí. Motivací pro testování dvouparametrové lomové mechaniky, založené na popisu pole napětí a deformací na čele trhliny pomocí faktoru intenzity napětí K a tzv. T-napětí, je fakt, že v některých případech popis pomocí jediného parametru K není v dostatečném souladu s realitou.



Obr.4: Závislost rychlosti da/dN na rozkmitu ΔK .

Rychlost šíření trhliny dle modifikovaného Parisova zákona [3] s ohledem na T-napětí je dána vztahem:

$$\frac{da}{dN} = C \left[\lambda \left(\frac{T}{R_{p0,2}} \right) \Delta K \right]^m, \text{ kde } \lambda \left(\frac{T}{R_{p0,2}} \right) = 1 - 0,33 \left(\frac{T}{R_{p0,2}} \right) + 0,66 \left(\frac{T}{R_{p0,2}} \right)^2 - 0,445 \left(\frac{T}{R_{p0,2}} \right)^3, \quad (3)$$

kde funkce λ byla odvozena pro tahový mód zatěžování, na základě porovnání velikostí plastických zón na čele trhliny pro různé kombinace faktoru intenzity napětí a T-napětí. Tato korekční funkce je užita i pro výpočty, kdy se jedná o smíšený mód namáhání, neboť poměr K_{II}/K_I je velmi malý.

Při uvažování T-napětí je pole napětí v blízkém okolí čela trhliny dáno vztahem:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left(K_I \cos^3 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \cos \frac{\theta}{2} \sin \theta \right) + T \sin^2 \theta, \quad (4)$$

kde T reprezentuje T-napětí, tedy napětí paralelní s lící trhliny. Směr šíření je stanoven na základě kriteria maxima tangenciálního napětí na čele trhliny, tedy:

$$K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) - \frac{16T\sqrt{2\pi r_c}}{3} \sin \frac{\theta}{2} \cos \theta = 0 \wedge \frac{\partial^2 \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta^2} \leq 0, \quad (5)$$

kde r_c je velikost tzv. procesní zóny, která může být považována za materiálový parametr. Úhel šíření trhliny daný vztahem (5) je řešen numericky a dá se ukázat, že pro případ tahového zatížení může existovat více řešení rovnice (5) pokud,

$$\frac{9}{128\pi} \left(\frac{K_I}{T} \right)^2 \leq r_c, \quad (6)$$

trhlina se tedy může podle tohoto modelu odchýlit od přímého směru. Více možných řešení je tedy možné očekávat i v případě smíšeného módu namáhání.

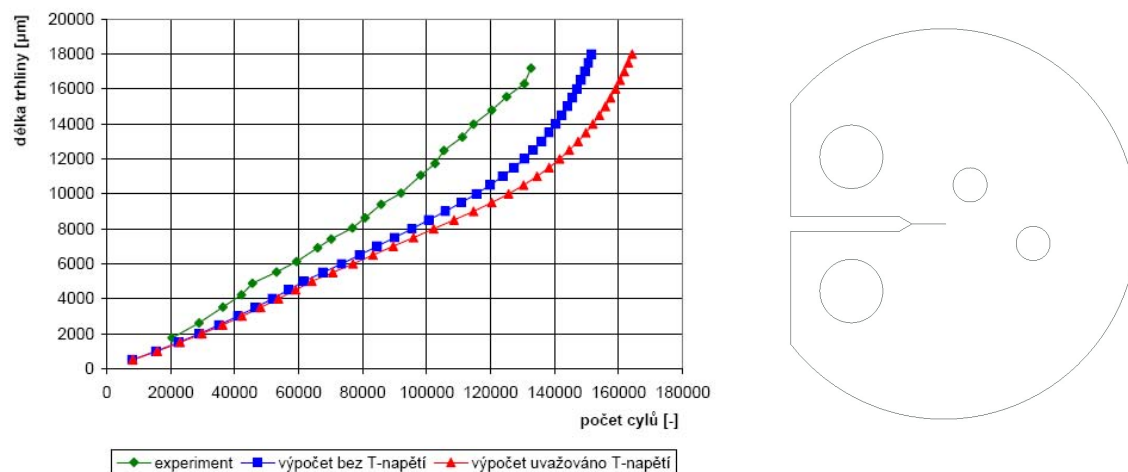


Obr.5: Sekvence snímku, výsledný tvar trhliny – CT vzorek s jedním otvorem - LuciaNet.

3.2 Dosažené výsledky a porovnání s experimentem

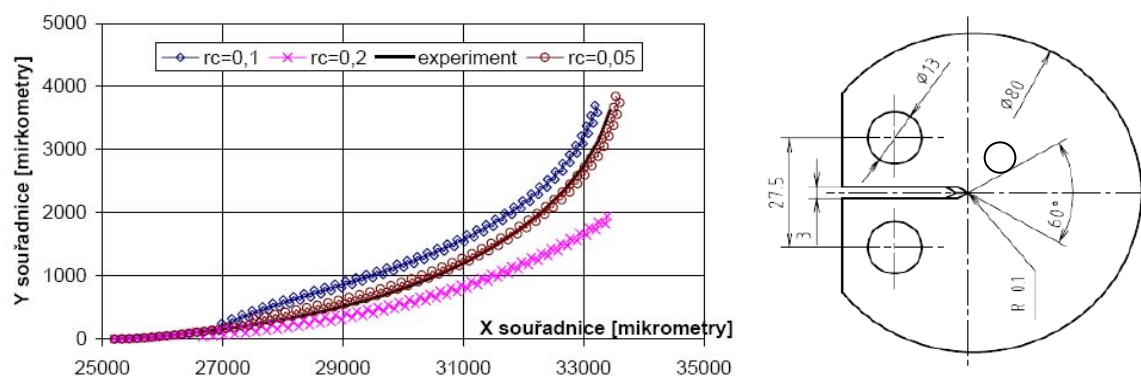
Pro ověření použitelnosti numerického modelu bylo provedeno experimentální měření na modifikovaném CT vzorku, ve kterém byly vyvrtány dva otvory dle Obr.6. Z experimentu byla získána jednak průběžná rychlost růstu trhliny, jednak její tvar. V simulacích byl uvažován lineární elastický materiál a zatížení stejné jako při experimentu.

Porovnání rychlostí růstu trhliny je vidět na Obr.6. Je vidět, že jednoduchý Parisův vztah nemůže zcela postihnout šíření trhliny při kombinovaném módu namáhání čela trhliny. Lepší výsledky nepřináší ani použití dvouparametrové lomové mechaniky dle vztahu (3), kde díky kladným hodnotám T-napětí v celém průběhu šíření trhliny dochází k ještě pomalejšímu růstu.



Obr.6: Růstové křivky pro CT vzorek se dvěma tvory, schéma CT vzorku se dvěma otvory.

Výpočet směru růstu trhliny podle vztahu (5) naráží na problém se stanovením hodnoty parametru r_c . Pro určení tohoto parametru bylo provedeno experimentální měření šíření trhliny v CT vzorku s jedním otvorem (Obr.7) a postupnými numerickými simulacemi s různými hodnotami r_c byla určena hodnota 0.05, pro kterou bylo dosaženo nejlepší shody s experimentem.



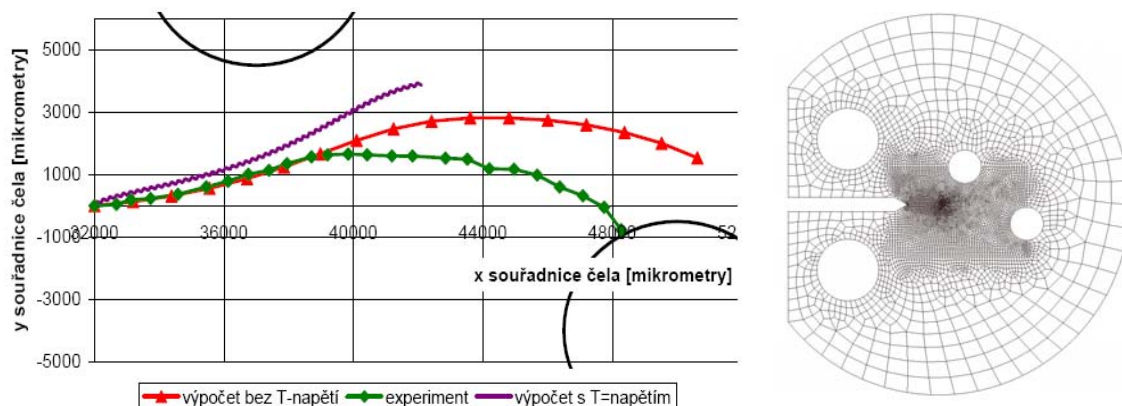
Obr.7: Tvar trhliny v simulacích s různým parametrem r_c , schéma CT vzorku s jedním otvorem.

Takto určený parametr r_c byl následně použit pro simulace šíření trhlin v CT vzorku s dvěma otvory. Srovnání tvaru konečného tvaru simulovaných trhlin s experimentálně změřeným je vidět na Obr.8. V počátečních stádiích šíření dosahují simulace velmi dobré shody s experimentem, nicméně v jistém okamžiku, který přibližně odpovídá ukončení testu v případě jediného otvoru dochází k nárůstu rozdílů mezi simulacemi a experimentem.

4. Závěr

Metodika použitá pro monitorování a vyhodnocování experimentálních únavových zkoušek, tzn. postupné snímání polohy čela trhliny na povrchu vzorku se ukázala jako vhodná a velmi přesná, což lze využít např. při určování prahové hodnoty rozkmitu faktoru intenzity napětí.

Testování numerického modelu ukázalo, že jednoduchý Parisův vztah není schopen zahrnout vliv smíšeného módu namáhání čela trhliny. Ani implementace dvouparametrové lomové mechaniky v podobě vztahu (5) nepřispěla k dosažení lepší shody s experimentem, což může být způsobeno ne příliš vhodnou modifikací původního Parisova vztahu. Rozdíly mezi numericky a experimentálně dosaženými výsledky však mohou být způsobeny anomálním chováním materiálu, což by vysvětlovalo rozdíly ve výsledném tvaru trhliny.



Obr.8: Tvar trhliny v CT vzorku s dvěma otvory, MKP model zkoušeného CT vzorku.

Směr trhliny byl určován na základě kritéria maximálního tangenciálního napětí, přičemž v jednom případě byl zahrnut vliv T-napětí a v jednom nebyl. Jak je vidět výsledky obou výpočtů a experimentu spolu dobře korespondují v počátečních fázích šíření, přičemž parametr r_c byl stanoven na CT vzorku s jedním otvorem. Následné rozdílné chování trhliny může být kromě anomálního chování materiálu vysvětleno tím, že hodnota r_c , která má zásadní vliv na směr šíření trhliny dle (5) není materiálovou charakteristikou, ale je závislá např. na stavu napjatosti, nebo hodnotě T-napětí. Rozdíl mezi výsledky modelu bez uvažování T-napětí a experimentem mohou být způsobeny zjednodušeným (jednoparametrovým) popisem pole napětí a deformací na čele trhliny.

Z dosažených výsledků je zřejmé, že bude třeba provést další sérii únavových zkoušek, na jejichž základě bude možné stanovit případný charakter závislosti r_c na stavu napjatosti nebo T-napětí. Jednou z možností je pokusit se o navržení vlastního kritéria pro určování směru a rychlosti růstu trhliny.

Poděkování: Tento výzkum je podporován grantem č. 101/06/1427 Grantové agentury České republiky a Výzkumným centrem spalovacích motorů a automobilů Josefa Božka.

Literatura

- [1] Seitzl, S.: *Dvouparametrová lomová mechanika - Popis krátkých únavových trhlin*, Ph.D. disertace, 2003
- [2] Broek, D.: *Elementary engineering fracture mechanics*, Marinus Nijhoff Publisher, 1982
- [3] Hutař, P., Seitzl, S., Kněsl, Z.: *Quantification of the effect of specimen geometry on the fatigue crack growth response by two-parameter fracture mechanics*. Materials science and engineering A, 2004
- [4] Kuželka, J.: *Numerický model šíření trhliny v podmínkách cyklického zatěžování s využitím dvouparametrové lomové mechaniky*, Diplomová práce, 2006.