



NUMERICKÝ MODEL ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY S VYUŽITÍM DVOUPARAMETROVÉ LOMOVÉ MECHANIKY

Josef Jurenka*, Miroslav Španiel*, Jiří Kuželka*

Summary: *V příspěvku jsou uvedeny některé výsledky výzkumu MKP modelování šíření únavových trhlin v podmínkách smíšeného módu namáhání. Pro simulování růstu únavových trhlin byl na pracovišti ČVUT vytvořen speciální programový modul v jazyce Python, který dovoluje automatickou tvorbu a modifikaci MKP modelu s trhlinou s ohledem na vyhodnocení lomových kritérií na čele trhliny. Simulace jsou prováděny v programu ABAQUS a pro popis stavu napjatosti na čele trhliny jsou využívána jednak klasická kritéria lineární lomové mechaniky a jednak jsou testovány přístupy dvouparametrové lomové mechaniky. Výsledky numerických simulací jsou porovnávány s experimentálními daty.*

1. Úvod

Se vzrůstajícími povozními požadavky na technické konstrukce a části strojů na jedné straně a se snahou o úsporu materiálu na straně druhé, vzrůstají i požadavky na metody a postupy při navrhování těchto součástí. Jednou z nejdynamičtěji rozvíjejících výzkumu se oblastí je oblast predikce únavové životnosti a zbytkové pevnosti konstrukcí s defektem typu trhlina. Možnost výskytu těchto defektů v konstrukcích je vždy nutné zahrnout do samotného procesu návrhu. Kritériem provozuschopnosti díla je poté predikce stability případně růstu daného defektu. Na základě těchto znalostí, je možné předepsat interval pravidelných servisních kontrol, neboli určit životnost konstrukce.

2. Numerické modelování

Základem prováděných numerických simulací je programový skript vytvořený v programovacím jazyce Python. Tento skript byl vytvořen na pracovišti Fakulty strojní při ČVUT v Praze a umožňuje v programu ABAQUS automatickou tvorbu MKP modelu s trhlinou, spuštění a vyhodnocení výpočtu a následnou modifikaci MKP modelu s ohledem na vypočtená lomová kritéria. Tímto způsobem lze provádět poměrně snadno rozsáhlé simulace šíření únavové trhliny.

V první etapě byly simulace zaměřeny na verifikaci algoritmu šíření dlouhých únavových trhlin. Při simulacích růstu trhlin byla použita jak v ABAQUSu již implementovaná lomová kritéria, tak i vlastní kritérium založené na výpočtu hodnoty J-integrálu. Zároveň byla provedena studie možnosti využití dvouparametrové lomové mechaniky a to jak z pohledu rychlosti tak i směru šíření trhliny.

* Ing. Josef Jurenka, Ing. Miroslav Španiel, CSc., Ing. Jiří Kuželka, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Technická 4, 160 07 Praha 6; tel: 224352527, e-mail: josef.jurenka@fs.cvut.cz

3. Popis pomocí dvouparametrové lomové mechaniky (K-T přístup)

Motivací pro použití dvouparametrové lomové mechaniky je skutečnost, že (jak plyne z některých experimentů [3]) rychlost šíření trhliny není možné uspokojivým způsobem popsat pouze jedním parametrem – faktorem intenzity napětí či J-integrálem. Hraje zde podstatnou roli faktor stísnění (constraint) na čele trhliny. V případě lineární lomové mechaniky je možné zahrnout faktor stísnění uvažováním konstantního členu Williamsova rozvoje – T-napětí, jedná se potom o popis K-T parametry. V případě nelineární lomové mechaniky je stísnění reprezentováno Q parametrem. Jedná se potom o popis trhliny parametry J-Q.

Stanovení směru šíření únavové trhliny

V případě dvouparametrové lomové mechaniky je napjatost v okolí čela trhliny charakterizována prvními dvěma členy Williamsova rozvoje, kde tangenciální napětí lze vyjádřit vztahem,

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

kde T reprezentuje T-napětí, tedy napětí paralelní s líci trhliny.

Směr šíření je stanoven na základě kriteria maxima tangenciálního napětí na čele trhliny, tedy

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

kde r_c je velikost procesní zóny, která je považována za materiálový parametr. Toto kritérium lze tedy chápat tak, že o směr šíření nerozhoduje napjatost přímo na čele trhliny, ale napjatost v jeho okolí charakterizovaném právě parametrem r_c . Úhel šíření trhliny daný vztahem (2) je řešen numericky. Toto kritérium je zahrnuto do zmiňovaného programového skriptu. Dá se ukázat, že pro případ tahového módu může existovat více řešení rovnice (2) pokud,

$$\frac{9}{128\pi} \left(\frac{K_I}{T} \right)^2 \leq r_c, \quad (3)$$

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

Stanovení rychlosti šíření únavové trhliny

Rychlost šíření trhliny je stanovena pomocí modifikovaného Parisova vztahu,

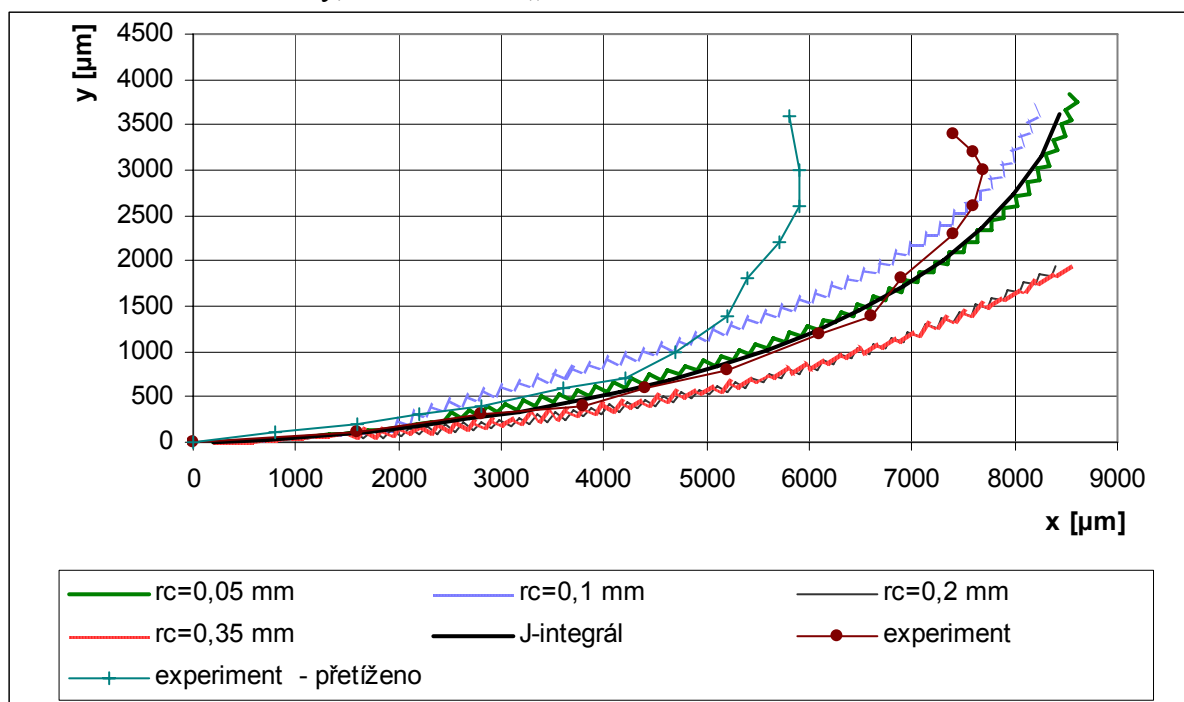
$$\frac{da}{dN} = C \left[\lambda \left(\frac{T}{R_{p0,2}} \right) \Delta K \right]^m, \text{ kde } \lambda \left(\frac{T}{R_{p0,2}} \right) = 1 - 0,33 \left(\frac{T}{R_{p0,2}} \right) + 0,66 \left(\frac{T}{R_{p0,2}} \right)^2 - 0,445 \left(\frac{T}{R_{p0,2}} \right)^3, \quad (4)$$

ve kterém je dle [3] zahrnut constraint na čele trhliny. Korekční 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 a tudíž velikost plastické zóny nebude příliš ovlivněna faktorem intenzity ve smyku.

4. Výsledky

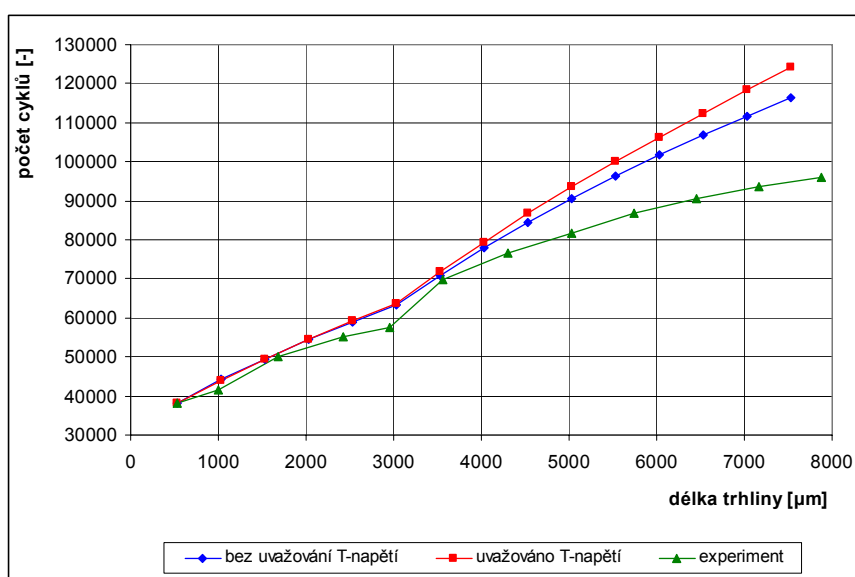
Byly provedeny celkem tři odlišné experimenty a jim odpovídající numerické simulace. Jedná se o šíření únavové trhliny v kruhovém CT vzorku s jedním otvorem, se dvěma otvory a ve vzorku bez otvorů. Byl sledován jak tvar, tak rychlost šíření trhliny.

Tvary trhliny pro vzorek s otvorem jsou znázorněny v Grafu 2. Z grafu je patrné, že vypočtené tvary trhliny, získané pomocí dvouparametrové lomové mechaniky, závisí na volbě materiálového parametru r_c . Při vyšších hodnotách T-napětí navíc dochází ke směrově nestabilnímu šíření trhliny, trhlina se šíří „cik-cak“.

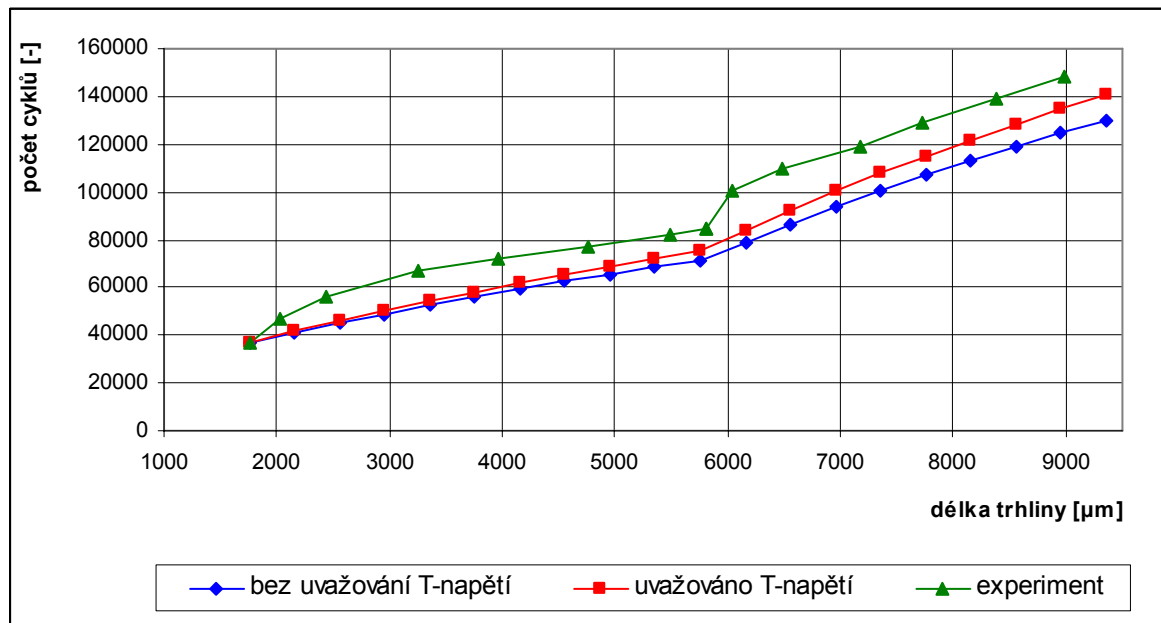


Graf 1– Vypočtené tvary trhlín pro CT vzorek s jedním otvorem

Rychlost šíření stanovená dle (4) vykazuje horší shodu s experimentem než nemodifikovaný Parisův vztah, jak je patrné z Grafu 2.



Graf 2 – Závislost počtu cyklů na délce trhliny pro vzorek s jedním otvorem



Graf 3 – Závislost počtu cyklů na délce trhliny pro vzorek bez otvoru

Naproti tomu v případě vzorku bez otvoru je shoda s experimentem lepší, je-li k výpočtu užito vztahu (4) oproti Parisovu vztahu. Výsledky vzorku se dvěma otvory nejsou dosud zcela vyhodnoceny, ale dílčí výsledky naznačují, že velikost procesní zóny nemusí být čistě materiálovým parametrem, ale že může záviset též na stavu napjatosti na čele trhliny.

5. Závěr

Z výsledků plyne, že užití kriteria (2) pro predikci směru šíření únavové trhliny není příliš vhodné, neboť řešení závisí značně na parametru r_c , navíc vykazuje směrovou nestabilitu, jak bylo naznačeno ve vztahu (4). Navíc je značně náročnější na výpočtový čas, než řešení prostředky jednoparametrové lomové mechaniky a nepřináší ani přesnější výsledky, jak je patrné z Grafu 2.

Užití modifikace Parisova vztahu dle [3] přineslo pro nás překvapivě přesnější výsledky pouze v případě zatížení tahovým módem, přestože je K_{II} řádově menší nežli K_I .

Dosavadní dílčí výsledky naznačují, že velikost procesní zóny nemusí být čistě materiálovým parametrem, ale že může záviset též na napjatosti na čele trhliny.

6. Acknowledgment

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

7. Literature

- [1] Seitzl, S.: Dvoupametrová 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 dvoupametrové lomové mechaniky, *Diplomová práce*, 2006