

KRITÉRIA LOMOVÉ MECHANIKY PŘI SIMULACI PİTTINGU

FRACTURE MECHANICS CRITERIA AND PİTTING SIMULATION

Miroslav ŠPANIEL, Josef JURENKA¹

Abstrakt

Studie prezentovaná v první části se zabývala možnostmi simulovat šíření pittingových trhlin pomocí MKP. Byl vytvořen zjednodušený MKP model ozubení, na kterém byla provedena studie vlivu vnější faktorů na šíření trhliny v podmínkách lineární elastické lomové mechaniky. V druhé části je uvedena jedna z verifikačních studií, jejíž cílem je verifikovat navržené algoritmy šíření trhlin v oblasti kombinovaného módu namáhání čela trhliny a ohodnotit přínosy implementace dvouparametrové lomové mechaniky s ohledem na rychlost a směr šíření.

Klíčová slova: pitting, simulace šíření únavové trhliny, dvouparametrová lomová mechanika.

Abstract

The study, which is presented in the first part of paper, deals with possibility of numerical simulation of pitting crack propagation in the FEM code. Simple model of gears was created. The mentioned study was carried out with respect to the influence of outer factors on crack propagation in the linear elastic fracture mechanics conditions. The second part contains a verification study of developed algorithms for crack propagation in mixed mode loading conditions of the crack tip. Further the benefit of two-parametric fracture mechanics implementation is evaluated with respect to the crack rate and direction.

Keywords: pitting, simulation of fatigue crack growth, two-parametric fracture mechanics.

ÚVOD

Simulace šíření únavových trhlin pomocí MKP se stále více využívá pro posouzení zbytkové životnosti konstrukcí, u nichž připouštíme při návrhu přítomnost iniciační trhliny, nebo její vznik během života díla. Metodika simulace šíření „dlouhých“ trhlin je poměrně snadno zvládnutelná s využitím lineární lomové mechaniky a je ověřená zejména v rovinných modelech pro základní módy namáhání. V technické praxi se však vyskytují často problémy, které překračují rámec těchto zavedených přístupů. Jedná se např. o chování dlouhých trhlin namáhaných smykovým módem II, nebo krát-kých trhlin, které se vyvíjejí ve složitém napět'ovém poli s elasto-plastickou odezvou materiálu na čele trhliny. Do druhé skupiny se řadí i únavové poškození kontaktních povrchů, tzv. pitting či spalling.

Toto poškození kontaktních povrchů se nejčastěji vyskytuje u ozubených kol, ložisek či železničních soukolí a kolejnic. Projevuje se zvýšením hlučnosti, vibrací a je často také příčinou výměny poškozeného dílu. Tyto vesměs negativní jevy, lze do jisté míry omezit či oddálit např. vhodnými povrchovými úpravami, či změnou tvaru kontaktního povrchu. Na základě těchto podnětů je na pracovišti Fakulty strojní ČVUT v Praze vyvíjen univerzální programový aparát pro simulaci růstu únavových trhlin ve 2D s finální aplikací v simulaci pittingu.

¹ Ing. Miroslav ŠPANIEL, CSc, Ing. Josef JURENKA, ÚM, FSJ ČVUT v Praze, miroslav.spaniel@fs.cvut.cz, josef.jurenka@fs.cvut.cz

Lektoroval: Ing. Ladislav NOVOTNÝ, PhD., KAMaM, SJF TU v Košiciach, ladislav.novotny@tuke.sk

STUDIE ŠÍŘENÍ TRHLIN TYPU PITTING

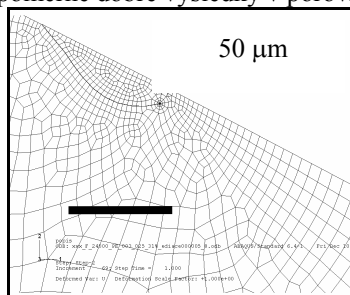
Ukazuje se, že pitting vzniká únavovým šířením krátkých trhliny v povrchových vrstvách kontaktních ploch. I když fyzikální podstata toho únavového procesu není zcela známa, na mnohých pracovištích se vyvíjejí numerické modely, jejichž cílem je simulovat růst a upřesňovat představu o skutečných příčinách vzniku pittingu. Hlavním cílem námi provedené studie bylo nalezení možných metodik a přístupu pro simulování šíření. Byl vytvořen zjednodušených parametrický MKP model několika zubů ozubeného soukolí. Do vhodného místa kontaktního povrchu byla zakomponována iniciační trhlina délky 0,015 mm s odklonem 23° od kontaktního povrchu. Přes oblast s trhlinou byl následně odvalován párový zub. V modelu bylo uvažováno tření jak na kontaktní plochách zubů, tak i uvnitř trhliny. Byl uvažován lineární elastický model materiálu. Působení kapalného maziva v trhlíně bylo zanedbáno s ohledem na jeho zatím diskutabilní vliv.

Směr přírůstku trhliny byl vyhodnocen na základě popisu stavu napjatosti na čele trhliny. Východiskem byla lomová kritéria lineární jednoparametrové lomové mechaniky (J-integrál). Startovním bodem simulací byla relativně krátká iniciační trhlina. Růst trhliny je realizován přírůstky, jejichž délka byla předem zvolena. Směr a počet cyklů zatížení (zubových záběrů) nutných k dosažení daného přírůstku je poplatný hodnotám výše zmíněných kritérií po jeho realizaci. Směr šíření trhliny byl určen dle metody virtuálního šíření trhliny, jejíž podstata spočívá ve vyčíslení hodnoty J-integrálu v různých směrech vzhledem k trhlíně a následném nalezení maxima. Přírůstek počtu cyklů je standardně dán Paris-Endorganovým vztahem či nějakou jeho modifikací na základě (změřených) materiálových charakteristik.

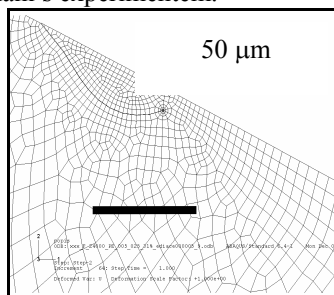
Numerický model byl realizován v prostředí MKP programu ABAQUS s využitím skriptovacího jazyka Python. Tato koncepce využívající k průběžné tvorbě tělesa s rostoucí trhlinou modelář a generátor sítě komerčního programu se při současném výkonu výpočetní techniky jeví jako únosná. Výsledky provedených simulací ukázaly, že navržené algoritmy jsou funkční. Pro ilustraci jsou na obr.1, 2 a 3 uvedeny výsledky ukazující vliv velikosti tření na kontaktních plochách na tvar vzniklého pittingu.

VERIFIKACE NAVRŽENÝCH ALGORITMŮ PRO ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÝCH TRHLIN

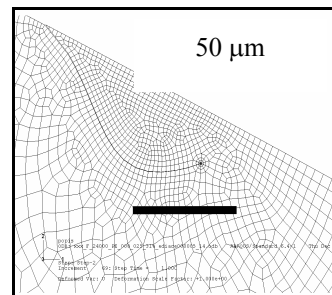
Základním předpokladem simulací šíření únavových trhlin je v současné době především znalost jednoho lomového kritéria, kterým může být faktor intenzity napětí K nebo J-integrál. Při splnění podmínek lineární lomové mechaniky (v oblasti dlouhých trhlin se zanedbáním vlivu plastické zóny) a při jednoduchém způsobu zatěžování (převážně módem I) dávají simulace poměrně dobré výsledky v porovnání s experimentem.



Obr.1 Výsledný tvar trhliny pro součinitele tření 0,03



Obr.2 Výsledný tvar trhliny pro součinitele tření 0,05



Obr.3 Výsledný tvar trhliny pro součinitele tření 0,08

Mnoho problémů technické praxe však nesplňuje výše uvedené omezující podmínky. Jedná se o oblast krátkých trhlin, kde není možné zanedbat vliv plastické zóny, nebo o trhliny šířící se ve složitém poli napjatosti s významnou složkou módu II namáhání. Do těchto oblastí můžeme řadit právě trhliny typu pitting. Ukazuje se, že popis pole napětí v okolí čela trhliny pomocí jednoho parametru (faktoru intenzity napětí K nebo J -integrálu) není v těchto případech dostačující. Východiskem se jeví použití také druhého členu Williamsova rozvoje, který je označován jako T -napětí, resp. Q -parametr, a který kvantifikuje podmínky constraintu.

Vliv T -napětí na rychlost šíření trhliny je možné vyjádřit pomocí modifikovaného Parisova-Erdonganova vztahu, např. dle [2]

$$\frac{da}{dN} = C \left[\lambda \left(\frac{T}{\sigma_0} \right) \right]^m K^m, \quad (1)$$

kde C a m jsou materiálové konstanty stejné jako pro případ nemodifikovaného vztahu a

$$\lambda(T/\sigma_0) = 1 - 0.30 \left(\frac{T}{\sigma_0} \right) + 0.52 \left(\frac{T}{\sigma_0} \right)^2 - 0.85 \left(\frac{T}{\sigma_0} \right)^3, \quad (2)$$

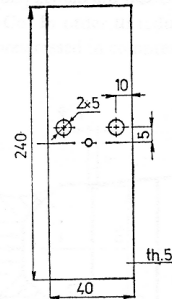
kde σ_0 je mez kluzu materiálu [2].

Vliv T -napětí na směr šíření trhliny není zatím jednoznačný a jeho uvažováním v kritériu maximálního tangenciálního napětí dostaneme dle [3] vztah

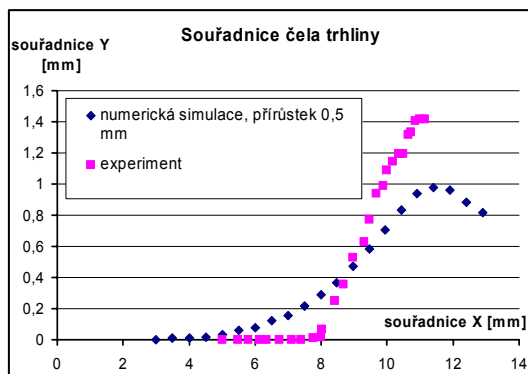
$$\left(\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} \right)_{\theta=\varphi_0} = K_I \sin \varphi_0 - K_{II} (3 \cdot \cos \varphi_0 - 1) + 2T \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 \sqrt{2\pi \cdot r} = 0, \quad (3)$$

kde parametr r je považován za materiálovou konstantu, jejíž velikost je podle [3] možné volit jako poloměr plastické zóny. Význam správné volby/experimentálního změření parametru r je vidět na obr.7, kde je zobrazeno grafické řešení nelineární rovnice (3). Parametrem grafů je hodnota r .

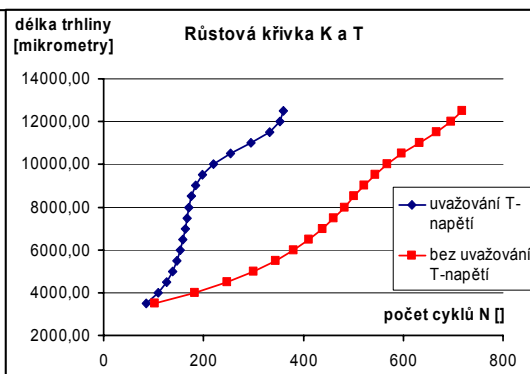
V rámci verifikace navržených algoritmů, který byly použity pro simulace vzniku pittingu, byly vytvořeny parametrické modely zkušebních těles (CCT uvedeno na obr.4 a CT), ve kterých je simulován růst únavových trhlin pomocí navržených algoritmů. Ucelené experimentální práce jsou zatím ve fázi příprav, nicméně předběžné výsledky pro CCT (modifikováno otvory) prezentované na obr.5 naznačují poměrně dobrou shodu s experimentem, který byl převzatý z práce [4]. Dále jsou na obr.6 uvedeny růstové křivky při uvažování a neuvažování T -napětí. Je vidět, že záporné T -napětí značně urychluje růst únavové trhliny.



Obr.4 Modifikovaný CCT vzorek



Obr.5 Souřadnice čela trhliny v průběhu šíření

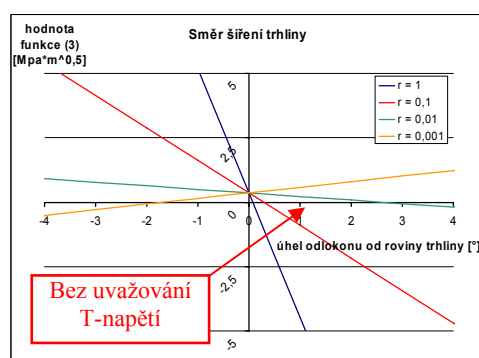


Obr.6 Vliv T-napětí na rychlost šíření trhliny

ZÁVĚR

Prezentovaná práce je první etapou výzkumu numerické simulace vzniku pittingu. Byla prokázána funkčnost naprogramovaných algoritmů pro simulaci šíření trhliny v rámci lineární lomové mechaniky. Dosažené výsledky mají ale pouze kvantitativní charakter, neb potřebná materiálová data se nepodařilo zajistit. Dále je prováděna verifikace algoritmů pro specifické okrajové podmínky a způsoby zatěžování (významný mód II namáhání) a jsou studovány možnosti a přínosy implementace dvouparametrové lomové mechaniky.

Tato práce vznikla za podpory GAČR 101/06/1427 a Výzkumného centra spalovacích motorů a automobilů Josefa Božka.

Obr.7 Vliv parametru r na směr šíření při uvažování T-napětí

LITERATURA

- [1] BROEK, D.: *Elementary engineering fracture mechanics*, Marinus Nijhoff Publisher, 1982
- [2] SEITL, S.: *Dvouparametrová lomová mechanika*. Popis krátkých únavových trhlin, Ph. D. dis., 2003
- [3] BEDNÁŘ K.: *Dvouparametrová lomová mechanika*: Výpočet parametrů a jejich význam při popisu chování únavových trhlin. Ph.D. disertace, 2000
- [4] KNĚSL Z.: *Numerical simulation of crack behaviour under mixed mode conditions*. Part I: linear-elastic fracture mechanics., Acta Technica ČSAV, 1987
- [5] FAJDIGA, G.: *Prispevek k širjenju utrujenostne razpoke na bokih zob zobnikov pri upoštevjanju EHD obremenitve*, Doktorská disertační práce, Univerzita v Mariboru, 2000