

# Oponentský posudek

disertační práce

Ing. Jana Ondráčka

## **Numerický model šíření únavové trhliny ve smíšeném módu zatěžování**

Vypracoval: Ing. Jakub Šedek, Ph.D.

Předložená disertační práce Ing. Jana Ondráčka byla vypracována na katedře materiálů Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské Českého vysokého učení technického v Praze. Zabývá se modelováním šíření magistralní únavové trhliny plastizujícím materiálem pomocí metody konečných prvků. Hlavní těžiště práce je ve vyjádření disipované plastické energie za cyklus v okolí čela trhliny a její korelace s rychlostí šíření. Rozsah práce je 123 stran.

### **Cíle práce**

Cíle práce jsou stanoveny v úvodu v jasné konkrétní formulaci:

1. Rozšířit energetické kritérium pro popis šíření únavové trhliny v tahovém módu I popsaného Klingbeilem a Nitturem do podmínek 2D smíšeného módu.
2. Implementovat toto kritérium do prostředí konečně-prvkového výpočetního balíku MSC.MARC formou fortranovských subrutin, tak aby doba celého výpočtu nepřekračovala neúnosnou míru a výpočet byl použitelný v praxi.
3. Provést kalibraci a ověření připraveného MKP modelu pro simulaci růstu únavové trhliny ve smíšeném módu porušování s experimentálními daty.

### **Náplň práce a vyjádření k obsahu**

Disertační práce je dělena na rešeršní část, část formulující problém k řešení a kapitoly vlastní práce zabývající se experimentem a numerickým modelováním šíření únavové trhliny ve smíšeném módu I a II.

Rešeršní část vymezuje hlavní pojmy pro popis šíření trhliny z pohledu lomové mechaniky a uvádí popis napjatosti v blízkém okolí čela trhliny. Základní popis rozšiřuje o popis napjatosti u zakřivené trhliny. Zatěžování trhliny rozděluje na proporcionální a neproporcionální mód zatěžování, čehož je později využito v numerickém modelování. Ústředním tématem rešeršní činnosti byla kritéria pro predikci šíření únavové trhliny ve smíšeném módu zatěžování. Rešeršní část jasně směřuje k prvnímu cíli práce.

Shrnutím literárních poznatků autor dospívá k závěru, že ve smíšeném módu zatěžování nebyla problematika šíření dlouhých únavových trhlin zatím spolehlivě vyřešena. S tím je nutno souhlasit, neboť většina v inženýrské praxi používaných přístupů se zabývá převážně pouze módem I. Rozšíření poznatků nejen do samotného módu II, ale především do kombinace obou by značně rozšířila možnosti a přesnost predikce šíření únavových trhlin při složitějších případech zatěžování.

Prezentované metody jsou rozděleny na metody založené na faktoru intenzity napětí a na energetickém přístupu. Autor se ve shrnutí literárních poznatků vyjadřuje k využití obou metod v modelování konečnými prvky (MKP). Tato oblast týkající se cíle 2 a 3 však není v rešeršní části příliš

rozvinuta, možná by proto bylo vhodnější vložit ještě jednu kapitolu o začlenění metod do analýz MKP a do shrnutí spíše zařadit kritické zhodnocení uvedených metod pro zamýšlené cíle. V dalších kapitolách je totiž zřejmé využití obou přístupů.

V jednostránkové kapitole 3 autor formuluje problém a nastiňuje možnosti jeho řešení. Vzhledem k obsáhlosti dalších hlavních kapitol působí trochu stručně.

Vlastní práce je dokumentována v kapitole 4, která má v titulu modelování šíření únavové trhliny ve smíšeném módu zatěžování. Nicméně, tato kapitola je dále dělena a obsahuje i podkapitolu s experimentální částí věnující se únavovým zkouškám provedeným samotným autorem, což je vhodné vyzdvihnout. Snaha o scelení vlastní práce do jedné hlavní kapitoly je zřejmá. Experimentální práce by si však také zasloužila zařazení mezi hlavní kapitoly ve struktuře práce, neboť až další podkapitoly se skutečně věnují modelování šíření. V použitém názvosloví hlavních kapitol by tak kapitola 4 mohla být přímo nazvána „Vlastní práce“.

K dalšímu členění práce není co vytknout, spíše pochválit, neboť ač je dosti rozvětvené, přesně vystihuje obsah jednotlivých podkapitol. Autor prováděl simulace šíření separátně v módu I, poté ve smíšeném proporcionálním módu I+II a v neproporcionálním módu I+II. Ke každé simulaci provedl porovnání s experimentem, ať už svým, svých předchůdců nebo literárně zdokumentovaném. Separátně také uvádí a diskutuje dosažené výsledky. V závěru práce jsou jasně uvedeny závěry k výsledkům numerických simulací.

Práce obsahuje seznam autorových publikací, použitých symbolů a zkratk, citované literatury a obrázků. Seznam tabulek chybí.

Text je obecně čtivý s bohatým komentářem postupů a výsledků. Použité obrázky jsou názorné a kvalitní. Nicméně, nabízejí se i další data, která by šla graficky zobrazit (Tab. 4 a 5) a některé obrázky ještě více popsat přímo v grafické oblasti i v popiscích (viz. Poznámky na konci). V textu je pár překlepů a chybného formátování několika odstavců (v poznámkách), což však neubírá na hodnotě práce. Celkově však z práce vyzařuje pečlivost.

## **Metody zpracování**

Autor svou práci pokračuje ve výzkumu odhadu rychlosti růstu únavové trhliny založeném na výpočtech disipované plastické energie v plastické zóně na čele trhliny a využívá zkušeností získaných na Katedře materiálů při FJFI. Poznatky rozšiřuje studiem smíšeného módu zatěžování. Vlastní experimentální pozorování šíření únavové trhliny ve smíšeném módu doplňuje analýzou rozsahu plastické zóny na povrchu zkušebního tělesa metodou nanoindentace a fraktografickou analýzou lomových ploch.

Pro experimentální část je rozdělena na několik oddílů. Jedná se o únavové zkoušky ve smíšeném módu zatěžování CT těles vyrobených z hliníkové slitiny a nerezové oceli, na kterém je provedeno i měření mikrotvrdoti v okolí čela trhliny a porovnáno s konečně-prvkovými výpočty plastické zóny. Součástí práce je i fraktografický rozbor lomových ploch vzorku z duralu. Zde vidím nevyužitý potenciál ohledně pracoviště doktoranda. Uvedený rozbor pouze dokumentuje lomové plochy jednoho vzorku, aťe hlubší smysl a napojení na další práci zde není příliš patrné. Autor se zde např. dotýká velikosti striací, ale hlubší analýza provedena nebyla. Např. grafické vyjádření kvantitativních dat, atd. V detailních snímcích by bylo příhodné doplnit jejich umístění v lomové ploše a zakótovat délku trhliny. Obecně, z hlediska cílů práce, nepovažuji uvedení těchto kapitol za nutné. Naopak důležité vyhodnocení rychlosti



šíření je v kap. 4.1.1 diskutováno, ale není graficky postiženo. Očekával bych klasický diagram  $da/dN - \Delta K_I$  resp.  $K_{II}$ . Uvedeno je až  $\Delta K_v$ , navíc je vyhodnoceno pouze na 1 tělese.

Numerické výpočty jsou provedeny metodou konečných prvků v systému MSC.Marc. Autor se zabývá velikostí a tvarem plastické zóny a výsledky koreluje s experimentálním měřením mikrotvrlosti v okolí čela trhliny. Zde opět platí předchozí poznámka, neboť výsledky měření nejsou příliš vypovídající a očividně nepřinesly vzhledem k vynaloženému úsilí kýžené výsledky, což dokumentují mapy rozložení mikrotvrlosti v okolí čela trhliny, které navíc postrádají označení os.

Výpočty uvažující šíření trhliny jsou provedeny na 2D i 3D modelech zkušebního tělesa, přičemž rozšíření do 3D si vyžadovalo doprogramování uživatelské subrutiny pro rozpojování uzlů. Výpočty šíření jsou provedeny pro čistý mód I i kombinace s módem II. Autor se věnuje i efektu zakřívání trhliny a jejich vztahu k podmínkám RD i RN, což je třeba ocenit, neboť úlohu dále komplikují.

Hlavní těžiště práce leží ve vyjádření disipované plastické energie za cyklus. V práci je provedena analýza citlivosti velikosti prvků sítě na vyjádřenou energii a velikosti a tvaru plastické zóny po čele trhliny v módu I. Autor nachází rozpor v literárních údajích pro odhad velikosti prvku sítě a uvádí vlastní doporučení. Postupně přechází k modelování trhliny zatížené ve smíšeném módu I a II. Zde vidím jako dobré rozhodnutí dále se přiklonit k numerickým výpočtům simulujícím stav RD, neboť v praxi probíhá růst únavové trhliny většinou právě ve stavu blízkém RD.

Ve smíšeném módu zatěžování je provedena analýza plastické zóny pro různé směry trhliny. Cílem bylo nalézt ekvivalentní lomově-mechanickou veličinu ve smíšeném módu, která by šla použít pro výsledky získané při šíření trhliny v čistém tahovém módu. Ze tří veličin byl vybrán ekvivalentní rozkmit faktoru intenzity napětí podle Richarda. Disipovaná energie je poté korelována s rychlostí šíření a porovnává s hodnotami dle Klingbeilova vztahu. Výsledky v módu I jsou přímo ukázkové, ve smíšeném módu se při nízkých rychlostech objevuje větší rozptyl vynesení dat, nicméně trend je zřetelný.

Do třetice je provedena obdobná analýza i pro neproporcionální mód zatěžování. Její výsledky jsou porovnány s literárními experimentálními daty, které však v případě smykového módu vykazují značný rozptyl. Výpočtové hodnoty však leží v oblasti omezené hraničními křivkami.

### **Dosažení cílů práce**

Z práce je zřejmé, že jasně formulované cíle byly splněny. První nosný cíl tvoří hlavní náplň disertace, zatímco další 2 cíle jsou víceméně podpůrné. Zde bych však očekával, že pokud je cíl jasně definovaný jako implementace, měla by práce obsahovat podrobnější popis naplnění cíle minimálně s implementačním schématem. Zdrojový kód by pak měl být v dodatku disertace. Je zřejmé, že tato časově i technicky náročná práce byla provedena, nicméně zamrzí, že není v textu příliš obsažena.

### **Vědecký přínos práce**

Autor provedl důkladnou rešerši dostupné literatury, formuloval problém a provedl mnoho numerických výpočtů, tak aby do problému dostatečně zabředl. Na pozadí celé práce bylo jistě značné úsilí především v implementaci vlastních subrutin do výpočtového prostředí a postprocessingu, které převyšuje obyčejné uživatelské znalosti softwaru. Velký přínos vidím v nalezení lomově-mechanického ekvivalentního parametru, kterým lze transformovat smíšený problém zatěžování na čistě tahový mód. Zde lze mluvit o dalším potenciálu pro pokračování práce a využití i jinými přístupy při modelování šíření trhliny. V použitém přístupu je třeba vytvořit velmi jemnou diskretizaci okolí čela trhliny, což značně zvyšuje náročnost celé úlohy. I přes současné dostupnější výpočetní kapacity vidím aplikovatelnost prezentovaného postupu stále jen v akademické oblasti a pro hlubší analýzu postupu trhliny při specifických potřebách inženýrské praxe.

### **Vyjádření k publikacím autora**

Autor uvádí 9 vlastních publikací vztahujících se k předložené práci, včetně popisu vlastní náplně. Z uvedeného obsahu je zřejmé, že publikace separátně prezentují jednotlivé kapitoly a hierarchicky směřují k dosažení cílů práce. Z uvedených publikací je většina prezentována na studentských vědeckých konferencích a u čtyřech se jedná o časopisy, přičemž minimálně u jednoho proběhlo recenzní řízení před publikací. U reference [6] je však doktorand chybně uveden jako hlavní autor. Je jistě škoda, že práce nebyla publikována v širším počtu odborných periodik, nicméně i během prezentací na studentských vědeckých konferencích byla práce jistě diskutována a konfrontována s názory odborné veřejnosti.

### **Shrnutí a otázky k obhajobě**

Předložená disertační práce vhodně formuluje problém a postup prací vede k úspěšnému dosažení vytyčených cílů. Velká část práce je založena na prezentovaných numerických analýzách, ale zvládnutí implementace potřebných úloh do výpočtového systému a následující zpracování výsledků již příliš popisováno není. Na jednu stranu je třeba tuto skrytou činnost vyzdvihnout, ale na druhou stranu je škoda, že se s ní autor nepodělil alespoň v dodatku. Mnoha pokračovatelům by tak ušetřil mnoho času, které by mohli věnovat rozšiřování myšlenek v této práci použitých.

Autor však prací prokázal schopnosti samostatné vědecké práce a kritického hodnocení dosažených výsledků. I přes uvedené poznámky hodnotím disertační práci jako velice zdařilou a doporučuji ji k obhajobě.

Na doktoranda bych mě následující otázky k diskusi:

- Ovlivňuje poloha dodatečné díry v CT tělese napjatost v okolí čela trhliny? Nezmění se úpravou standardizovaného tělesa vztahy pro vyhodnocení?
- Pro vyhodnocení experimentu na str. 50 je uveden výpočet  $\Delta K$  pomocí MKP ve stavu RN. Proč nebylo použito podmínek RD?
- Závisí vyjádření disipované energie i na oblasti v úplavu? Byla analyzována i disipace energie při otupování "výstupků" zůstávajících v úplavu trhliny?
- Jak moc se projeví 10% disipované energie v rychlosti šíření trhliny? Otázka směřuje k tomu, jak se projeví přesnost výpočtu energie na odhadu rychlosti.
- Na čem závisí parametr  $\alpha$  v Richardově vztahu a jak by se dal určit?

V Praze dne 11.11.2019

Ing. Jakub Šedek Ph.D.