



OPONENTNÍ POSUDEK

disertační práce

Ing. Jana Ondráčka

NUMERICKÝ MODEL ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY VE SMÍŠENÉM MÓDU ZATĚŽOVÁNÍ

V Praze dne 20. 11. 2019

Vypracoval : **Prof. Ing. Milan Růžička, CSc.**

Úvod

K posouzení byla předložena disertační práce Ing. Jana Ondráčka, vypracovaná v rámci doktorského studia na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze. Práce se zabývá numerickým modelováním (pomocí MKP) šíření magistralní únavové trhliny v plastizujícím materiálu a to při tahovém i smíšeném (tahově-smykovém módu zatěžování, I+II) při proporcionálním i neproporcionálním cyklickém zatěžování. Práce obsahuje 123 stran textu a je rozčleněna do pěti kapitol.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Predikce únavové pevnosti a životnosti dílů je jedním z hlavních témat řešení při navrhování dílů strojních konstrukcí. Při navrhování konstrukcí filosofie „s přípustným poškozením“ (Damage Tolerance) je nezbytné provádět experimentální ověření i výpočtové simulace šíření únavové trhliny v potenciálním místě porušování a stanovit bezpečnou etapu provozování dílů s případným defektem (trhlinou). Protože se práce zaměřuje na tuto oblast, s cílem vývoje nových pokročilých metodik s možností zpřesnění výpočtů pro složitější zatěžovací módy a časové průběhy zatěžování, lze toto téma hodnotit jako velmi potřebné a aktuální pro praxi.

Zhodnocení dosažení cílů práce, použitých metod a postupu řešení

Autorovým hlavním cílem disertační práce bylo, jak uvádí „úprava algoritmu simulace růstu nesymetrické únavové trhliny ve smíšeném módu porušování I + II v duralových slitinách, jejíž sklon nebo změna směru šíření je vynucena změnou směru zatěžování nebo geometrií tělesa.“ Domnívám se, že za přispění školitele mohl autor tyto cíle formulovat ambiciózněji, tak aby vyzněla „více disertabilně“ ve smyslu nalezení nových dosud nepublikovaných přístupů, v souladu s požadavky zákona č. 111/1998 Sb. Po přečtení a posouzení práce jsem došel k závěru, že autor vytvořil vlastní původní metodiku a navrhl kritéria pro popis šíření únavové trhliny za podmínek smíšeného módu zatěžování I+II a verifikoval tuto metodu na experimentálních datech, a tím disertabilitu beze zbytku naplnil.

Autor vycházel z důkladné rešerše problematiky, ve které zmapoval kritéria užívaná dosud pro popis šíření trhliny ve smíšených módech zatěžování, a to jak pro popis rychlosti šíření trhliny, tak predikci jejího směru rozvoje. Podrobně rozebral napěťově-deformační stavy na čele prostorového šíření čela trhliny v kombinovaném módu zatěžování a popsal příčinu změn tvaru čela trhliny. V kap. 3 formuloval řešený problém a nastínil cesty k řešení, které rozebírá podrobně v následné kapitole 4, která je stěžejní pro vlastní přínos k problematice. Obsahuje podkapitoly popisující realizované experimenty i MKP simulace.

Autor k řešení vytčeného cíle použil postupy numerické analýzy pomocí MKP a dále realizoval vlastní experimenty na tělesech zatěžovaných kombinací módů I+II pro dva typy materiálů. Další experimentální data převzal též z literatury. Charakter poškození a morfologii lomu při různých módech zatěžování hodnotil pomocí fraktografické analýzy, ověřoval možnost stanovení tvaru plastické zóny v okolí kořene trhliny pomocí měření tvrdosti nano-indentorem i numerickou simulací. To svědčí o komplexnosti přístupu autora k problematice disertace a hledání dalších souvislostí, které by pomohly vysvětlovat výsledky experimentů a upřesňovat simulace. Vytvořil 2D a 3D MKP modely a ověřil potřebnou hustotu sítě pro uspokojivou přesnost modelování napěťově deformační odezvy v okolí kořene trhliny. Zabýval se dále ověřováním vhodnosti použití různých kritérií pro vyjádření ekvivalentního rozkmitu faktoru intenzity napětí ve smíšeném módu. Ověřoval také vhodnost použití energetických přístupů založených na kumulaci disipované plastické energii před čelem trhliny a rozšířil ho pro využití ve smíšeném módu zatěžování.

Komentáře, stanoviska a dotazy k výsledkům disertační práce

Autor se v kap. 4.1 věnuje únavovým zkouškám sledování šíření trhliny na CT tělesech vyrobených ze slitiny D16CT1 zatěžovaných módem I a poté kombinovaným módem I+II. Zkoušky realizoval na třech tělesech, a výsledky přírůstků trhlín porovnává na obr. 4.5. V podkapitole 4.4.2.2. porovnává experimentální data s výsledky simulací šíření pomocí MKP. Na str. 90 autor popisuje „spárování“ výpočtu a experimentu pomocí aproximační funkce pro rychlost šíření trhliny. **Mohl by doktorand blíže vysvětlit postup získání přírůstků dW/dN pro experimentální data na obr. 4.44 pomocí této funkce? Mohl by autor pro názornost přímo porovnat vypočtená a naměřená data vůči sobě, tj. obr. 4.41 a 4.42 vůči 4.44 a okomentovat shodu/neshodu? Jak by autor v tomto kontextu komentovat výsledky pro tělesa 2 a 3, které se od tělesa 1 významně liší a porovnávány nebyly?**

Za přínos pokládám studii porovnávající vhodnost použití různých kritérií pro stanovení ekvivalentního rozkmitu faktoru intenzity napětí při smíšeném módu zatěžování, uvedenou v podkapitole 4.4.1.2. Vyplývá z ní vhodnost použití kritéria dle Richarda pro daný materiál, které dále ověřil na experimentálních datech pro těleso č.1. Na druhou stranu vhodnost kritéria může být omezena na daný typ materiálu, jak potvrzují některé další publikované studie.

Rovněž tak je přínosná kapitola 4.5.7 diskutující výsledky šíření při neproporcionálním zatěžování. Experimentální práce provedené Plankem a Kuhnsem, ze kterých autor vycházel, poskytují cenná data. Experimentální data vykazují značný rozptyl přisuzovaný složitostí kontaktu nových povrchů přírůstků trhlín při smykovém cyklickém pohybu čel trhlín. Tyto jevy je obtížné, ne-li nemožné, vhodně modelovat. Disertant realizoval simulace při cyklickém smykovém zatěžování módem II a při tahovém konstantním předpětí trhliny módem I. Mohou se však vyskytovat i další typy kombinací, které výrazně ovlivňují zejména úhel i rychlost šíření trhlín v kombinovaném módu. Podle typu použitého materiálu na tento jev bude významně působit i lokální elasto-plastické chování materiálu na čele trhliny. Autor to prezentuje a

komentuje na symetričnosti/nesymetričnosti tvarů plastické zóny při modu I a při kombinaci módů a to v podmínkách RN i RD.

V literatuře byla publikována rovněž kritéria, která se tento efekt snaží pomocí teorie plasticity do MKP simulací zahrnout (např. práce Dahlin, P. – Olsson, M. aj.). Zjistilo se, že počáteční růst trhlin kovů spadá do dvou kategorií: kovy s vysokou pevností splňují kritérium MTS (maximálního tečného napětí – dle Sinha a Erdogana), zatímco více tvárné kovy splňují kritérium směru šíření trhliny MTSR (rozkmitu maximálního tečného napětí – Dahlin, Olsson). Složitější teorie reverzní plasticity se snaží vysvětlit i další efekty s tím spojené, zejména retardace/akcelerace trhlin při přetížení v různých zatěžovacích módech. To by však již přesahovalo rámec vytčených cílů předložené práce. V této souvislosti mám na autora následující dotazy:

Jaký model plasticity byl při modelování materiálu v různých případech výpočtů implementován? Jaký má autor názor na dostatečnost použití lineárního modelu zpevnění (případ obr. 4.38) pro simulace cyklických plastifikačních dějů v okolí trhliny pro uvažované typy materiálů?

Původní přínosy disertační práce

Disertační práce ing. Jana Ondráčka přináší řadu původních experimentálních výsledků a návrh nových pokročilých metod numerického modelování růstu únavové trhliny při I+II módu při proporcionálním i neproporcionálním cyklickém zatěžování. To umožňuje zvýšení spolehlivosti při predikování zbytkové životnosti konstrukcí.

Formální úroveň práce

Formální úroveň práce hodnotím jako velmi dobrou. Pisatel užívá srozumitelný technický jazyk bez významových i stylistických nepřesností. Definiuje a vysvětluje všechny potřebné pojmy a veličiny. V práci jsem nelezl nadbytek překlepů a obecně nese známky pečlivosti. Tabulky, grafy i obrázky jsou čitelné a vypovídající, v textu komentované.

Za jistý formální nedostatek považuji absenci citací vlastních prací autora přímo v textu disertační práce. Z komentáře a soupisu devíti prací autora, uvedených v na počátku DP však vyplývá, že všechny úzce souvisejí s tématem disertace a publikují tak její hlavní výsledky, jak požaduje zákon č. 111/1998 Sb.

Závěrečné hodnocení

V disertační práci doktorand Ing. Jan Ondráček prokázal velmi dobrou orientaci v problematice únavy materiálu a popisu šíření trhlin včetně experimentálních analýz a numerických simulací. Disertant získal řadu původních experimentálních výsledků a navrhl nové pokročilé metody numerického modelování růstu únavové trhliny při I+II módu při proporcionálním i neproporcionálním cyklickém zatěžování.

I přes položené dotazy a vznesené připomínky usuzuji, že cíle práce byly naplněny. Konstatuji, že předložená disertační práce splňuje kritéria, jak je vymezuje zákon č. 111/1998 Sb. paragraf 47 odst. 4, tj. že obsahuje původní výsledky, které byly uveřejněné nebo jsou přijaté k uveřejnění. Doporučuji práci k obhajobě.

Milan Růžička