

OPONENTSKÝ POSUDEK DOKTORSKÉ PRÁCE

Autor: Ing. Michal Bartošák

Název: Fenomenologické modelování porušení se zaměřením na teplotní únavu

Univerzita: ČVUT, FS, Katedra mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Oponent: prof. Ing. Petr Paščenko, Ph.D., Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů.

Stroje a strojní součásti, zejména pak v energetickém a chemickém průmyslu, jsou často vystaveny společným účinkům *mechanického* a *teplotního* zatěžování. Jedná se například o tělesa a komponenty tlustostěnných tlakových zařízení, jako jsou chemické reaktory či vysokotlaké ohříváky. V běžné praxi se předchází únavovým lomům těchto zařízení vhodným dimenzováním pomocí často konzervativních zjednodušených metod, uvedených v normách a předpisech. Tyto metody neumožňují dostatečně přesné posouzení konstrukcí na teplotně-mechanické zatěžovací podmínky (TMF - Thermo-Mechanical Fatigue Conditions). U konstrukcí vysokého významu, ke kterým patří zejména jaderná zařízení primárního a sekundárního okruhu, se však v případě potřeby přistupuje k podrobným zpřesněným vědecko-technickým metodám posuzování na nízkocyklovou únavu. Tyto metody se stále zdokonalují a verifikují pomocí výpočtových analýz MKP a experimentálních dat.

Doktorská práce, která má převážně teoretický charakter, je zaměřena na výzkum nízkocyklové a teplotně-mechanické únavy tvárné litiny SiMo 4.06, používané např. v automobilovém průmyslu pro výrobu skříní turbín turbodmychadel či výfukových potrubí. V práci jsou uvedeny výsledky rozsáhlých jednoosých zkoušek nízkocyklové a teplotně-mechanické únavy, provedených pro různé rychlosti a hladiny amplitud deformace v rozsahu teplot $20^{\circ}\text{C} \div 750^{\circ}\text{C}$. Doktorandem byl v rámci dizertační práce sestaven unifikovaný visko-plastický materiálový model, který byl následně implementován do konečně-prvkového řešiče komerčního programu ABAQUS jako uživatelská funkce. Součástí práce je návrh nového kritéria pro hodnocení životnosti při nízkocyklové teplotně-mechanické únavě. Kritérium je založeno na disipované hysterezní energii se zahrnutím středního napětí.

Cíle dizertační práce

Cíle dizertační práce shrnul doktorand do několika následujících bodů:

- 1) **Návrh nového energetického kritéria únavy** ke stanovení životnosti konstrukce zatížené buď v rámci *LCF* (*Load Cycle Fatigue*) či *TMF* (*Thermo-Mechanical Fatigue*) zatěžovacích podmínek. Kritérium je kalibrováno pomocí *LCF* a *TMF* vlastních experimentálních dat. Hlavním požadavkem je robustnost a stabilita kritéria tak, aby bylo použitelné pro stanovení životnosti komplexních inženýrských konstrukcí.
- 2) **Vývoj řídicího algoritmu** pro nově zkonstruované zkušební zařízení, navržené s ohledem poměr cena-výkon, a které lze použít na jednoosé řízení poměrných deformací *LCF* a *TMF* testů.

- 3) **Experimentální výzkum lité oceli SiMo 4.06** podrobené LCF a TMF zatěžovacím podmínkám. Výsledkem jsou *experimentální data*, potřebná pro kalibraci jak visko-plastického materiálového modelu, tak i modelu poškození, které lze použít v LCF/TMF metodách pro predikci životnosti inženýrských konstrukcí.
- 4) **Implementace a numerická integrace** vybraného visko-plastického materiálového modelu pomocí uživatelské materiálové procedury do komerčního uživatelského konečně prvkového programu. Formulace a analytické odvození konzistentní tangenciální tuhosti, která je klíčovým bodem pro řešení velkých inženýrských problémů. Validace konzistentní tangenciální tuhosti.
- 5) Vývoj kalibračních nástrojů pro vybraný unifikovaný visko-plastický model materiálu. Návrh nové metody pro kalibraci teplotně závislých materiálových parametrů. **Kalibrace konstitutivního materiálového modelu** na základě experimentálních LCF a TMF dat. Validace kalibrovaného materiálového modelu pomocí získaných experimentálních dat.

Dosažení stanoveného cíle

Na základě prostudování doktorské práce lze konstatovat, že cíle práce byly splněny.

Úroveň rozboru současného stavu řešené problematiky

Doktorand postavil rozbor současného stavu řešené problematiky na prostudování rozsáhlého množství odborných článků a publikací tuzemských a zejména zahraničních výzkumných pracovníků v daném oboru, viz lit. [2]-[85]. Kromě problematiky nízkocyklové a teplotně-mechanické únavy bylo nezbytné rozšířit rozbor o moderní přístupy numerického řešení rozsáhlých materiálově-nelineárních úloh MKP, viz lit. [1], a dále o rozbor efektivního provádění a řízení experimentů souvisejících s danou problematikou viz lit. [A.16]. Z rešeršní kapitoly dizertační práce a dále z porovnání výsledků analýz a experimentů jednoznačně vyplývá, že rozbor současného stavu řešené problematiky byl proveden na vysoké úrovni.

Teoretický přínos dizertační práce

Na základě podrobné rešerše dané problematiky a na základě teoretických úvah sestavil doktorand v rámci dizertační práce *energetické kritérium únavy* ke stanovení LCF/TMF zkušebních vzorků lité oceli SiMo 4.06. Výsledky výpočtů únavy pomocí tohoto kritéria se ukázaly ve velmi dobré shodě s výsledky ověřovacích experimentů. Doktorand nashromáždil velké množství experimentálních dat ke *kalibraci konstitutivního materiálového modelu*, který byl následně zakomponován do knihovny komerčního software ABAQUS (MKP) pro účely výpočtových analýz reálných inženýrských konstrukcí. Doktorand výsledky svého výzkumu opublikoval v zahraničních časopisech (Materials at High Temperatures, Engineering Failure Analysis), a dále je prezentoval na tuzemských a zahraničních konferencích a seminářích (např. LCF8, Eight Conference on Low Cycle Fatigue in Dresden).

Praktický přínos dizertační práce

Na ČVUT Praha, FS byl v rámci dizertační práce vytvořen řídicí algoritmus nově navrženého a postaveného zkušebního standu, který umožňuje relativně levnou a dostatečně přesnou verifikaci teoretických výsledků nízkocyklové únavy LCF/TMF zkušebních vzorků. Výpočtový model chování materiálu SiMo 4.06 byl zakomponován do knihovny materiálů komerčního programu ABAQUS (MKP) pro možnost použití při řešení praktických úloh v oblasti strojírenství. Doktorand tím výrazně přispěl k vytvoření metodiky a prostoru pro tvorbu výpočtových modelů nelineárního chování *dalších konstrukčních ocelí*, často používaných v praxi.

Při současné úrovni techniky považuje oponent předmětnou metodiku za přínosnou zejména pro řešení únavové životnosti tzv. *technických děl*, tzn. strojních konstrukcí vysokého významu (např. komponenty automobilového průmyslu s velkou četností opakování či zařízení do jaderných a klasických elektráren), popř. pro řešení speciálních případů, které nelze řešit s dostatečnou přesností běžně dostupnými metodami. Uplatnění metodiky by se však také našlo zejména při *rozvoji a modernizaci současných, často konzervativních metod norem a předpisů pro vyhodnocování únavy*.

Pozn.: Oponent by uvítal, kdyby byl v dizertační práci již v krátkosti uveden příklad použití nové metodiky posuzování únavy na reálné inženýrské konstrukci. Absenci takového příkladu však oponent nepovažuje v žádném případě za nedostatek či chybu dizertační práce.

Vhodnost použitých metod řešení

Jak již oponent uvedl, metodiku považuje za přínosnou zejména pro řešení únavové životnosti tzv. *technických děl*, tzn. strojních konstrukcí vysokého významu. Problematické by však mohlo být zavádění předmětné metodiky v současné podobě do *běžné strojírenské praxe*, kde většinou nelze očekávat odborné znalosti konstruktérů a výpočtářů, dosahujících hranice současného poznání vědy a techniky. Zde se téměř výhradně pracuje často s konzervativními, avšak praxí prověřenými a dostatečně zjednodušenými metodami, uvedenými v normách a předpisech (normy pro tlaková a jaderná zařízení ČSN EN 13445, AD-Merkblätter, ASME Code Sect. XIII, ASME Code Sect. III, NTD ASI, popř. normy pro ocelové konstrukce ČSN EN 1993-1, DIN 1090, atd.).

Způsob, jak byly použité metody aplikovány

Z dizertační práce není zcela zřejmé, jestli již byla navržená metodika použita na řešení únavy reálné konstrukce. Tato skutečnost však nijak nesnižuje úroveň či význam práce.

Prokázání doktoranda odpovídající znalosti v daném oboru

Autor prokázal v rešeršní části své dizertační práce dostatečné znalosti, potřebné k tvorbě fenomenologického modelu stanovení únavové životnosti inženýrských konstrukcí, podrobených LSF/TMF zatěžovacím podmínkám. V oblasti mechaniky těles je autor dále podrobně obeznámen s principem metody konečných prvků a MKP analýzami. Ve své práci se autor

odvolává na relevantní články významných tuzemských i zahraničních výzkumných pracovníků, působících v oblasti vytyčené dizertační prací. Autor si je na základě prostudované literatury a podrobného rozboru problematiky evidentně vědom nutnosti *kalibrace vytvořeného modelu včetně verifikace výsledků numerických analýz pomocí experimentálních dat*. Z toho důvodu byla teoretická část práce doplněna o experiment, a to na zkušebním standu ČVUT - FS, na jehož vývoji se autor práce spolupodílel.

Formální úroveň práce

Formální úroveň dizertační práce je standardní, je napsána v jazyce anglickém, a to logicky a přehledně. Názvy jednotlivých kapitol jsou odpovídající obsahu. Autor dodržuje citační etiku. Grafy a obrázky jsou tištěny v odpovídající velikosti s odpovídajícím popisem.

V textu se vyskytuje několik formálních překlepů, které jsou zcela nepodstatné a nenarušují logické uspořádání textu. Jako příklad bych uvedl na str. 51, 11. řádek odshora chybí sloveso „are“ či na straně 71, 10. řádek odspoda je místo „it is“ napsáno „its“.

Pozn.: Text dizertační práce je poměrně hutný. Proto by možná bývalo vhodné doplnit text více o základní vztahy či grafickou interpretaci. Jako příklad lze uvést graf závislosti σ - ε pro více cyklů s patrným kinematickým zpevněním.

Doporučení práce k obhajobě

Na základě prostudování doktorské práce lze konstatovat, že autor odvedl *výbornou práci* a prokázal tím svoje schopnosti úspěšně působit ve své další profesní dráze jako vědecký pracovník. Lze ho tedy bez jakýchkoliv námitek doporučit k obhajobě dizertační práce za účelem získání titulu Ph.D.

Otázky:

- 1) Vysvětlit pojmy: tangenciální matice tuhosti vs. tangenciální tuhost.
- 2) Vysvětlit, zda je ve zpracovaném výpočtovém modelu zahrnuta do celkové kumulace poškození oxidace, tzn. $D_{total} = D_{oxidation} + D_{fatigue} + D_{creep}$ (2.9). Pokud ano, pak do jaké míry se lze na výsledky výpočtových analýz zkorodovaných konstrukcí spolehnout.
- 3) Krátce popsat úspěšnost metody, pokud již tato byla použita v praktickém případě.

V Pardubicích, 27.5.2019

prof. Ing. Petr Paščenko, Ph.D.