

Phenomenological models for lifetime prediction under low-cycle fatigue and thermo-mechanical fatigue loading conditions

Ing. Michal Bartošák

Disertační práce, FS ČVUT 2019, 85 stran.

Práce shrnuje výsledky komplexního teoreticko-experimentálního výzkumu zaměřeného na nízkocyklové (LCF) a teplotně-mechanické (TMF) únavové vlastnosti tvárné litiny SiMo 4.06, která je používána v automobilovém průmyslu. Na novém testovacím zařízení byly realizovány rozsáhlé mechanické zkoušky uvažovaného materiálu pro různé rychlosti a amplitudy deformačního zatížení v teplotním rozsahu 20-750°C. Teoretické práce směřovaly na vývoj fenomenologického materiálového modelu porušení s uvažováním nízkocyklové a teplotně-mechanické únavy včetně jeho implementace do programu Abaqus a kalibrace materiálových parametrů pro získané experimentální výsledky. Hlavním výstupem práce je návrh nového kritéria založeného na disipované hysterezní energii a zahrnující rovněž vliv středního napětí pro hodnocení životnosti strojních dílů z tvárné litiny SiMo 4.06 s respektováním nízkocyklové teplotně-mechanické únavy.

V kapitole 2 jsou shrnuty současné poznatky problematiky nízkocyklové teplotně-mechanické únavy z pohledu dostupných experimentálních technik, používaných konstitutivních modelů či metod pro výpočet životnosti. V kapitole 3 jsou prezentovány použité metody, a to konkrétně metoda radial return použitá při integraci elasticko-plastických konstitutivních vztahů, dvě procedury z programu MATLAB: *i)* hledání vázaného extrému nelineární funkce více proměnných pro optimalizaci parametrů kinematického zpevnění a *ii)* nelineární řešič nejmenších čtverců pro kalibraci materiálových parametrů. Dále je použita statistická metoda pro predikci odhadu spolehlivosti. Všechny použité metody byly v předložené práci adekvátně aplikovány.

V kapitole 4 jsou formulovány cíle práce, které jsou rozděleny do pěti skupin. Prvním cílem je návrh nového kritéria pro hodnocení životnosti komplexních inženýrských částí při nízkocyklové teplotně-mechanické únavě. Další dva cíle jsou spojené s měřením nízkocyklových teplotně-mechanických únavových vlastností tvárné litiny SiMo 4.06 zahrnující i realizaci řídicích algoritmů pro nově navržené testovací zařízení. Dalším cílem je numerická implementace navrženého viskoplastického materiálového modelu do programu Abaqus, včetně odvození konzistentního tečného operátoru, který zaručuje kvadratickou konvergenci Newtonovy-Raphsonovy metody. Posledním cílem je vývoj vhodných kalibračních procedur pro stanovení materiálových parametrů zvoleného viskoplastického modelu. Je možné konstatovat, že všechny vytčené cíle představují logické milníky obsáhlého výzkumu nízkocyklového teplotně-mechanického únavového chování tvárné litiny SiMo 4.06.

V kapitolách 5-7 jsou detailně popsány výsledky práce. Způsob vypracování těchto kapitol potvrzuje erudici autora a jeho dobrou orientaci ve zkoumané problematice. Kapitola 5 shrnuje původní výsledky LCF a TMF experimentálních zkoušek, které byly realizovány na novém zkušebním zařízení Strojní fakulty ČVUT. Na základě získaných experimentálních výsledků je navržen vhodný viskoplastický materiálový model, který je popsán v kapitole 6 včetně numerické implementace do programu Abaqus. Dále je zde popsáno analytické odvození konzistentního tečného operátoru pro implicitní integrační schéma včetně ověření správnosti na testovací úloze válcového vzorku s vrubem, a rovněž i procedura pro kalibraci materiálových parametrů. Výsledky LCF simulací pro různé teploty a jejich validace s experimentem jsou přehledně shrnuty v odstavci 6.4.1. V kapitole 7 je podrobně

popsán návrh nového kritéria pro hodnocení životnosti při nízkocyklové teplotně-mechanické únavě založeného na disipované hysterezní energii a vlivu středního napětí. V kapitole 8 jsou přehledně shrnuty hlavní teoretické a praktické výstupy disertační práce, následované celkovými závěry a směry dalšího výzkumu prezentovanými v kapitole 9. Podle mého názoru je **významným praktickým přínosem disertace návrh nového kritéria pro hodnocení životnosti komplexních strojních součástí při nízkocyklové teplotně-mechanické únavě**. Výhodou nového kritéria jsou jednak nižší požadavky na potřebné numerické simulace oproti standardnímu přístupu založenému na hledání kritické roviny a rovněž i nižší nároky na testovací experimentální vybavení.

Závěr: Předkládaná disertační práce prokazuje vysokou náročnost zvoleného tématu, erudici autora a jeho poctivý přístup, s nímž otevřeně diskutuje získané výsledky. Je třeba především ocenit široký rozsah, komplexnost a pracnost zpracované tematiky nízkocyklového teplotně-mechanického únavového chování tvárné litiny SiMo 4.06. Formální úroveň práce je též na velmi vysoké úrovni: práce je pečlivě zpracovaná, logicky strukturovaná a napsaná velmi dobrou angličtinou. Rovněž vysoko hodnotím autorovo osobní zhodnocení, diskusi i dílčí závěry, kterými je zakončena každá kapitola.

Celkově je možné konstatovat, že autor prokázal velmi dobré znalosti problematiky. Jeho disertační práci jednoznačně **doporučuji k obhajobě**.

Otázky:

- V kapitole 6.4.2. je provedena validace odvození konzistentního tečného operátoru na testovací úloze výpočtu válcového vzorku s vrubem. Je možné během výpočtu řídit časový integrační krok v programu Abaqus? Je nutné jej dodržet konstantní či je možné ho adaptivně řídit např. na základě aposteriorního odhadu chyby?
- Konstitutivní model tečení je založen na hyperbolickém sinu, který nemusí správně predikovat vypočtenou odezvu materiálu pro větší rozsahy rychlosti deformace. Jaký interval pro rychlosti deformace může tento model prakticky postihnout a jak by bylo implementačně náročné za tímto účelem funkci tečení upravit, např. doplněním dalších členů?

V Praze, dne 27. května 2019

Ing. Dušan Gabriél, Ph.D.

Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i.