

Experimentální Analýza Napětí 2007

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF ELASTO-PLASTIC STRAIN AND STRESS IN NONPROPORTIONAL FATIGUE LOADING

EXPERIMENTÁLNÍ A VÝPOČTOVÁ ANALÝZA ELASTO-PLASTICKÝCH DEFORMACÍ A NAPĚTÍ PŘI NEPROPORCIONÁLNÍM ÚNAVOVÉM ZATĚŽOVÁNÍ

Karel Doubrava, Milan Růžička, Zbyněk Hrubý, Jan Papuga¹, Miroslav Balda, Vladislav Fröhlich²

Abstract: A new method and a PragTic programme for prediction of lifetime for the multiaxial loading were developed at Center of Material Diagnostics, IT in Pilsen and at Faculty of Mechanical Engineering CTU in Prague. Cap steel specimens of a tube shape with 2 mm thickness of the wall were tested for various combined tensile and torsion load. Cyclic-deformation curves were assigned by means of experiments. The preparation, measuring and evaluation of measured data are described in the paper. The specimens were loaded in range of high and low-cycle loading, while the value of elastic and plastic components of the strain tensor on specimen surface was determined by means of the strain gauge rosettes. The temperature of the specimen is measured by temperature sensor, acquired data of elasto-plastic path have been evaluated by means the MATLAB code. Numerical simulation was performed by means of the ABAQUS FE-code

Keywords: fatigue, elasto-plastic strains, low-cycle loading

1 Úvod

Poškození konstrukce v důsledku vyčerpání únavové životnosti některé její součásti patří mezi ekonomicky nákladné problémy, jimž se dá předejít v průběhu návrhu dané konstrukce. Objektivní posouzení s ohledem na životnost je ovlivněno kvalitou dostupných materiálových křivek a podrobnou znalostí mechanických a jiných procesů vedoucích k iniciaci a rozvoji defektu.

V rámci grantového projektu GAČR 101/05/0199 jsou na pracovištích ÚT AV v Plzni a FS ČVUT v Praze vyvíjeny metody a program PragTic pro predikci životnosti při vícerozměrném zatěžování. Jsou zkoušeny vzorky z uhlíkové oceli 11 523 tvaru hladké trubky s tloušťkou stěny 2 mm při různých zatěžovacích cestách kombinace tahového a torzního namáhání. Experimentálně byly určeny cyklické deformační křivky pro oba typy základního zatěžování. V příspěvku jsou kromě této etapy experimentů dále popsány postupy přípravy, vlastního měření a vyhodnocení tenzometrických měření na vzorcích při jejich cyklování v oblasti vysokocyklové i nízkocyklové únavy. Velikost elastických i plastických složek tenzoru deformace na povrchu vzorku byla získána z měření pomocí tenzometrických růžic. Provozní teplota vzorku byla monitorována snímačem teploty, aby bylo možno provést korekce měřených deformací. Vyhodnocení naměřené elasto-plastické cesty bylo provedeno v programu MATLAB. Experimentálně

¹Ing. Karel Doubrava, Ph.D., prof. Ing. Milan Růžička CSc., Ing. Zbyněk Hrubý, Ing. Jan Papuga Ph.D.: Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, odbor pružnosti a pevnosti, Fakulta strojní, ČVUT v Praze; Technická 4, 166 07 Praha 6; tel.: +420-224 352 525, e-mail: Karel.Doubrava@fs.cvut.cz

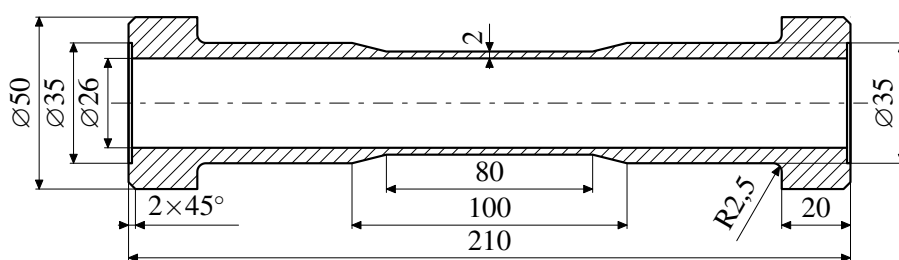
²prof. Ing. Miroslav Balda DrSc., Bc. Vladislav Fröhlich: CDM ÚT AV ČR, Veleslavínova 11, 301 00 Plzeň, tel.:+420-377 236 415, e-mail:balda@cdm.it.cas.cz

realizované průběhy zatěžování byly za použití vhodného konstitutivního modelu použity k modelování odezvy materiálu pro zkoušené zatěžovací cesty. Numerické simulace jsou prováděny pomocí MKP programu ABAQUS v.6.6. Pro takto určené průběhy složek tenzoru napětí a deformace je programem PragTic predikována životnost a porovnána s životností skutečnou.

2 Experiment

Pro zjištění vlastností materiálu při cyklickém namáhání byly vyrobeny vzorky trubkového tvaru s rozměry upravenými dle požadavků pro upnutí vzorků do zkušebního stroje viz obr. ???. Experimenty byly prováděny na zatěžujícím stroji ZUZ 200–1 (obr. ??) vyrobeného firmou INOVA Praha s možností kombinovaného axiálně-torzního zatěžování.

Stroj je umístěn na pracovišti CDM UT AV v Plzni. Jedná se o servohydraulický stroj s pracovním rozsahem síly ± 200 kN v oso-
vém směru a momentu ± 1000 Nm v krutu.



Obr. 1: Schéma zkoumaného tělesa

Pro sledování deformace vzorku byly na vzorky nainstalovány tenzometrické snímače 1-RY41-6/120 vyrobené firmou HBM. V průběhu zatěžování byla sledována teplota vzorku pomocí teplotního snímače Pt100. K instalaci tenzometrické růžice i teplotního čidla bylo použito lepidlo Z 70 od firmy HBM.

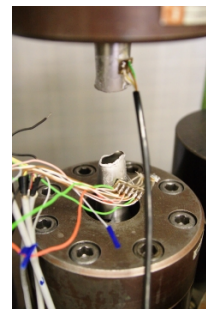


Obr. 2: Zkušební stroj s upnutým vzorkem

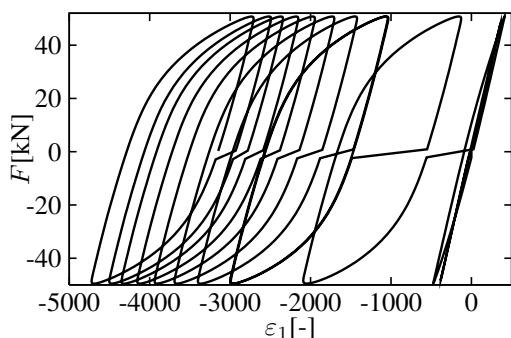
Tenzometrické a teplotní snímače byly připojeny k aparatuře Spider8. Pro měření signálů z tenzometrů a k měření signálů zatěžující síly a momentu na napěťovém výstupu ze zkušebního stroje byly použity kanály SR-55. Teplotní snímač byl připojen ke kanálu SR-01. Dynamická tenzometrická ústředna Spider8 byla přes rozhraní USB připojena k notebooku s nainstalovaným softwarem Catman Easy. Program a ústředna Spider8 jsou produktem firmy HBM. Z důvodu následného vyhodnocení byl proveden záznam naměřených dat ve formě textového souboru. Vzhledem k možnostem zapojení snímačů na ústředně Spider 8 bylo pro měření deformací zvoleno půlmostové zapojení, kdy pro druhou větev mostu byl použit nezatížený vzorek. S ohledem na rozdílné teploty zatíženého a nezatíženého vzorku byla využita samokompenzační vlastnost s ohledem na teplotní namáhání použitých tenzometrických růžic.

Pro popis únavových vlastností při víceosém namáhání byly voleny různé módy zatěžování kombinace tah a krut. V této fázi projektu byly hodnoty zatížení voleny s ohledem na nízkocyklovou únavu. Při těchto zatíženích docházelo k překročení meze kluzu zkoumaného materiálu. V případě nevhodně zvolené frekvence zatěžování docházelo k prudkému nárůstu teploty vzorku. Vysoká teplota spolu s velkými deformacemi pak vedla k narušení spávné funkce tenzometrického tmelu a ke znehodnocené měření deformací. S ohledem na získané zkušenosti, pak byla frekvence zatěžování volena tak, aby teplota vzorku nepřesáhla hodnotu 60 °C.

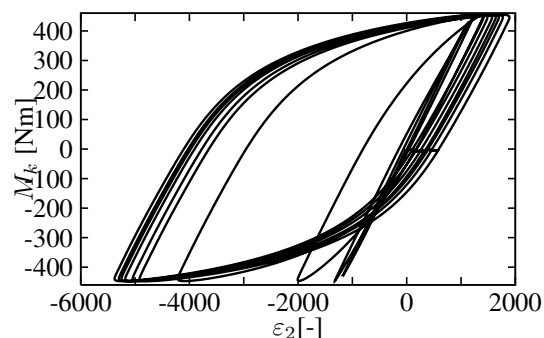
Při zkoumaném zatížení jsou měřeny deformace, kdy amplituda těchto deformací je v řádu tisíců mikrojedinotek. Při dosažení několika tisíc zatěžovacích cyklů pak dochází k poruše nejvíce zatíženého tenzometrického vinutí, kdy toto je zřejmě způsobeno vyčerpáním únavové životnosti vinutí snímače. S ohledem na velké množství naměřených dat bylo nutno pro vyhodnocení experimentu naprogramovat makro pro načtení požadovaných hodnot. Makro bylo vytvořeno pomocí matematického programu MATLAB. Jednou ze získaných materiálových vlastností byly cyklické deformační křivky. Na obr. ?? a ?? jsou příklady naměřených deformací při vybrané hladině zatížení pro dosažení saturovaných křivek.



Obr. 3: Porušený vzorek



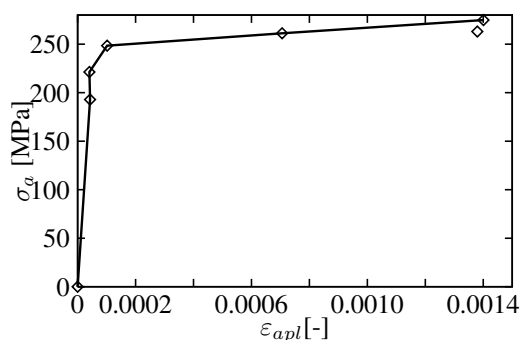
Obr. 4: Závislost tahová-tlaková síla vs. osová deformace



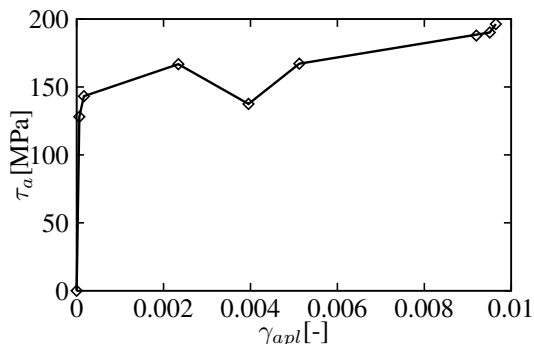
Obr. 5: Závislost krouticí moment vs. šikmá deformace

Takto získaná data pak umožnila určit konstanty v rovnicích (??) a následně cyklické deformační křivky pro daný materiál viz obr. ?? a ??.

$$\sigma_a = K' \varepsilon_{apl}^{n'}, \quad \tau_a = L' \gamma_{apl}^{m'} \quad (1)$$



Obr. 6: Cyklická deformační křivka pro tah



Obr. 7: Cyklická deformační křivka pro krut

Takto získané materiálové parametry cyklických deformačních křivek slouží jako vstup nelineární stress-strain křivky pro MKP simulaci reálné deformační odezvy vzorků na složité kombinované zatěžující procesy [?].

3 MKP výpočty a program Pragtic

MKP prostředí ABAQUS nabízí mimo jiné možnost modelování cyklického chování materiálu v oblasti elastoplasticity [?], [?]. Pro danou aplikaci byl zvolen model s kombinovaným isotropním a nelineárním kinematickým zpevněním. Pro vstup do únavového post-processingu byla

použita data výsledků nelineárního MKP výpočtu odezvy na zatížení na zmiňovaném vzorku [?]. Program PragTic [?] (www.pragtic.com), je třetí generací softwaru vyvíjeného na ČVUT pro výpočet únavového poškození na základě MKP výsledků. Výsledky získané z MKP výpočtů byly použity pro zhodnocení životnosti podle uniaxiálních i multiaxiálních metod. Dříve publikované výsledky [?] představovaly nedostatečnou shodu experimentálně zjištěných a početně určených životností. V současnosti se připravují výpočty s nově získanými materiálovými parametry s očekáváním lepší shody.

4 Závěr

Při měření deformací na součástech zatížených s ohledem na nízkocyklovou únavu je třeba sledovat teplotu zkoumaného tělesa z důvodu možného značného nárůstu teploty, a dále zřejmě po dosažení určitého množství cyklů s ohledem na vysokou amplitudu měřených deformací dojde k poruše snímače v důsledku vyčerpání únavové životnosti vinutí tenzometrického snímače. Kovové tenzometry mají s ohledem na dříve popsání chování omezený počet změřených cyklů. Změřená data posloužila k upřesnění materiálových charakteristik s ohledem na predikci únavové životnosti jak nízko- tak vysokocyklové. Byly provedeny srovnávací výpočty pomocí MKP programu ABAQUS a proveden únavový post-processing pomocí programu PragTic.

Poděkování: Příspěvek byl podpořen grantovým projektem GAČR 101/05/199.

Literatura

- [1] ABAQUS Online Documentation: *Version 6.6*, ABAQUS Inc. , <http://man.fsid.cvut.cz:2080/v6.6/>, 2005
- [2] Hrubý, Z., Růžička M.: *Využití MKP při predikci životnosti pomocí lokálních přístupů*, Výpočty konstrukcí metodou koečných prvků 2005 , ZČU v Plzni, s.24-31, 2005
- [3] Hrubý, Z., Papuga, J., Růžička M., Balda, M., Svoboda, J.: *Prediction and verification of the lifetime for various combined tensile and torsion load*, Engineering Mechanics 2006 , ÚTAM, AV ČR,s. 116-117., Praha 2006
- [4] Papuga, J.: *Mapping of Fatigue Damages – Program Shell of FE-Calculatation*, PhD Thesis , ČVUT v Praze, Praha <http://www.pragtic.com> 2005