

E xperimentální A nalýza N apětí 2004

CREATION OF EXPERIMENTAL DEVICES FOR DETERMINATION OF FRACTURE TOUGHNESS THROUGH J-R CURVES

VYTVORENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH PROSTŘEDKŮ PRO STANOVENÍ LOMOVÉ HOUŽEVNATOSTI PROSTŘEDNICTVÍM J-R KŘIVEK

Petr Jaroš, Ladislav Korec¹

Measurement of fracture toughness by standard test of CT specimen become a dominant method of material testing. A conceive survey of demands to experimental devices from the new version of standard ASTM E1820-01 will be noticed and compared with true features of new devices developed for this purpose. Results of a few introductory applications with some new interesting conclusions will be presented.

Key words extensometer, potential drop method, real tension diagrams, true strength

1. Úvod

Experimentální lomovou mechaniku je možno chápat jako nejbližší příbuzný obor experimentální pružnosti a pevnosti, jelikož je logickým pokračováním deformačního děje následujícího po iniciaci nespojitosti kontinua vznikem trhliny, tedy nového tvaru tělesa s následnou výraznou změnou napěťového pole, které je velmi obtížně analyticky popsitelné. Praxe v mnoha případech vyžaduje odhad stability a rychlosti šíření vzniklé trhliny, což představuje velmi náročnou úlohu a to i v případě, že je poměrně dobře znám časový průběh zatěžovacích stimulů. Vedle mnoha faktorů, ke kterým patří tvar a velikost tělesa, charakter jeho zatížení, virtuální rychlost uvolnění energie zatížení a další faktory, je zásadní pro uvedený cíl materiálová vlastnost nazývaná odedávna lomová houževnatost, která se stanovuje experimentálně různými testovacími metodami (např., rázovým ohybem vrubovaných nosníků na Charpyho kladivu, Robertsonovou zkouškou atd.). V nové době se stále častěji uplatňují metody simulující co nejbližše skutečnou situaci provázející vznik provozních trhlin, tedy iniciaci makroskopické trhliny v koncentrátoru napětí v poli s tahovým statickým předpětím v superpozici s únavou. Za účelem porovnatelnosti výsledků jsou standardizovány jak tvary vzorků, tak zatěžovací režimy pro iniciaci únavových trhlin, jejichž rozvoj je předmětem vlastního testu [1].

S ohledem na zásadní význam celé problematiky pro teorii a praxi lomové mechaniky je v kooperaci pracovišť ZČU Plzeň, ÚTAM AVČR a TECHLAB s.r.o. Praha prováděn komplexní výzkum podporovaný grantem GAČR reg. č.. 101/03/0731. Tento příspěvek shrnuje první etapu experimentální části zaměřené na vytvoření a odzkoušení experimentálních prostředků za účelem

¹ Ing. Petr Jaroš, CSc: TECHLAB, s.r.o., Sokolovská 207, 190 00 Praha 9

Ing. Ladislav Korec, CSc: TECHLAB, s.r.o., Sokolovská 207, 190 00 Praha 9

splnění všech relativně náročných normativních požadavků. Jedině tak mohou být výsledky testů účinně využity pro vytvoření spolehlivých matematických modelů, jež jsou hlavním cílem grantového projektu [2].

2. Popis experimentálních prostředků

Test CT vzorku vyžaduje podle [1] sledování tří veličin v průběhu zatížení vzorku tahem při řízení rovnoměrným posuvem:

- Síly, která se stanovuje kvalitním siloměrem, jenž je zpravidla součástí zkušebního stroje.
- Dráhy síly, která se určuje snímačem posuvu situovaným na přímce procházející působíšti síly, na který jsou kladeny vysoké požadavky (viz dále odst. 2.1).
- Změny plochy nosného kritického průřezu, což je metodicky nejobtížnější problém, k jehož řešení je v normě ponechána dosti značná volnost. Ideálně by bylo nutné sledovat průběžně polohu křivky čela trhliny, což je dosud nesplnitelný úkol. Nejbližšího přiblížení k tomuto cíli lze dosáhnout pravděpodobně analýzou změny budícím proudem vhodně vytvořeného elektrického potenciálového pole, tzv. potenciálovou metodou (viz dále odst. 2.2).

2.1 Snímač posuvu

Ačkoli se v podstatě jedná jen o pokud možno málo hmotný snímač posuvu s velkým rozsahem, dále uvedené požadavky normy [1] jsou takové, že jeho realizace je dosti náročná.

- Tvar a velikost musí být přizpůsobeny prostoru, který je k dispozici při zvolené, rovněž normou vázané, geometrii CT vzorku s ohledem na základní požadavek, kterým je měření přírůstku vzdálenosti působíšť tahové síly.
- Rozlišení na výstupním signálu musí být přinejmenším na 32 000 dílků v měřicím rozsahu.
- Stabilita v 10 min. intervalu musí být lepší, než 0,0125 % měřicího rozsahu.
- Šum signálu musí být nižší, než 0,006 % měřicího rozsahu.

Tyto požadavky se podařilo splnit vyrobením speciálního břitového extenzometru s tenzometrickým principem snímání deformace ohybu měrné části, jehož schematický obrázek znázorňující jeho polohu v CT vzorku je na obr. 1a (Všechny obr. jsou pouze v rozšířené verzi).

Stejný extenzometr byl využit po doplnění smyčky z bronzové struny pro měření obvodu kruhových vzorků (obr. 1b), což umožnilo stanovení skutečného průřezu, a následně i skutečného napětí, v celém průběhu tahové zkoušky (viz odst. 3.1).

2.2 Potenciálová metoda

Tato všeobecně známá metoda založená na přesné analýze potenciálového pole ve vodivých tělesech byla pro sledovaný cíl v průběhu několikaletého vývoje z hlediska měřicí techniky značně zdokonalena. Vytvořený přístroj pracující při s volitelnou frekvencí střídavém napájení konstantním proudem na principu synchronní detekce dovoluje potlačení všech obvyklých nepříznivých jevů, zejména termoelektrických, elmg. rušení a skinefektu. Měřicí princip a způsob matematického vyhodnocení výstupního signálu pro rozmanité aplikace (měření plastických a creepových deformací, sledování šíření trhlin ve svarech, měření změn tloušťky stěn korozi a erozí) jsou podrobněji uvedeny např. v příspěvku [3]. Pro dosažení hlavního cíle, kterým je v tomto případě plocha rostoucí trhliny, bylo hledáno optimální rozložení elektrod z hlediska

citlivosti a pokud možno i linearity alespoň v první (zároveň nejzajímavější) fázi růstu trhliny. Výsledné rozmístění elektrod je znázorněno na schematickém obr. 1a.

3. Výsledky prvních aplikací

3.1 Tahové válcové vzorky s různými koncentrátoři

Vlastním testům CT vzorků předcházely zkoušky na válcových vzorcích s cílem získání co největšího přehledu mechanických vlastností zkoušeného materiálu s potenciálním využitím v matematickém modelu predikce šíření trhliny. Proto nebylo setrváno pouze u normovaných (smluvních) tvarů vzorků a vyhodnocovaných parametrů, ale byly připojeny i další veličiny, zejména skutečné napětí a z něj odvozená skutečná pevnost, při různých koncentrátořech a tudíž i typech napěťových polí charakterizovaných faktorem stísnění h definovaným vztahem

$$h = \frac{1}{3\sigma_{\text{HMH}}}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z), \quad (1)$$

kde $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ jsou složky tenzoru napětí a σ_{HMH} je redukované napětí podle hypotézy H-M-H.

Za tím účelem byly testovány tři typy vzorků A, B a C s různými koncentrátoři napětí, jejichž společným znakem byl maximální $D = 10$ mm i minimální $d = 6$ mm průřez (obr. 2).

Spolu se zatěžovací tahovou silou F byly sledovány tři parametry: podélné prodloužení břitovým extenzometrem s měrnou bází 10 mm, změna obvodu kritického průřezu a změna potenciálového pole v okolí kritického průřezu.

Za nový experimentální postup lze považovat využití extenzometru popsaného v odst. 2.1 s opásáním obvodu v místě kritického průřezu dle obr. 1b, což při snímání výstupu extenzometru ozn. $\Delta\ell$ dovoluje průběžné stanovení následujících veličin: průměrné relativní deformace v příčném směru

$$\frac{\Delta d}{d} = -\frac{\Delta\ell}{\pi d} \quad (2)$$

relativní změny plochy kritického průřezu

$$\frac{\Delta A}{A} = \left(1 - \frac{\Delta\ell}{\pi d}\right)^2 - 1 \quad (3)$$

skutečného průměrného podélného napětí při působící síle F

$$\sigma_{\text{TRUE}} = \frac{F}{A'} = \frac{4\pi F}{(\pi d)^2 - 2\pi d\Delta\ell + \Delta\ell^2} \quad (4)$$

Souhrnné výsledky testů tří trojic vzorků na každém z materiálů:

- vysoce legovaná ocel 15CH2MFA pro tlakové nádoby reaktorů (ozn. O),
- vysokopevnostní dural ČSN 424203.6 užívaný v letectví (ozn. D).

uvádí tab.1.

3.2 CT vzorky

Na tomto cílovém typu vzorků proběhly prozatím pouze ověřovací experimenty, které přinesly uspokojivé výsledky z hlediska všech použitých experimentálních prostředků. Jako příklad lze uvést srovnání charakteristik jinak identických vzorků, z nichž na jednom byla iniciační délka trhliny připravena cyklickým zatížením (obr. 3a) a na druhém byla vyjiskřena (obr. 3b).

Tab.1: Experimentální výsledky smluvních σ_{MAX} a skutečných σ_{TRUE} hodnot pevnosti

Označení vzorku	Typ vzorku (faktor stísnění h)	σ_{MAX} (MPa)	σ_{TRUE} (MPa)	Průměr skupiny (MPa)	
				σ_{MAX}	σ_{TRUE}
O-1	A (h = 0,333)	780	1223	768	1282
O-2		744	1303		
O-3		779	1321		
O-4	B (h = 0,625)	1048	1419	1063	1381
O-5		1043	1321		
O-6		1099	1404		
O-7	C (h = 1,004)	1160	1403	1186	1436
O-8		1167	1399		
O-9		1230	1507		
D-1	A (h = 0,333)	495	612	493	601
D-2		502	601		
D-3		481	589		
D-4	B (h = 0,625)	541	589	557	615
D-5		557	620		
D-6		573	636		
D-7	C (h = 1,004)	601	629	614	645
D-8		640	681		
D-9		601	626		

4. Závěr

Stěžejní poznatky z uvedených aplikací jsou následující:

1. Úspěšně realizované stanovení průměrné hodnoty skutečného napětí v kritickém průřezu extenzometrem doplněným opásáním pro měření obvodu vede ke zjištění, že skutečná pevnost je narozdíl od smluvních hodnot jen málo závislá na typu napěťového pole s převážně tahovými složkami (viz tab.1). Tento poznatek bude pravděpodobně využitelný i v širších souvislostech pro účely matematického modelování stability trhliny.
2. Způsob přípravy iniciační trhliny na CT vzorcích značně ovlivňuje počáteční fáze jejího růstu (do dráhy síly asi 1,5 mm). Kritická síla při vyjiskřené trhlíně byla 1,6x vyšší, než při trhlíně vytvořené cyklickým zatěžováním. Hlavní příčinou není ostrost kořene, ale především mechanické vlastnosti materiálu před čelem trhliny v oblasti její budoucí trajektorie, kde je ve druhém případě vyčerpána únavová životnost, jinými slovy snížena tvárnost a tudíž i houževnatost materiálu. Je třeba vyzdvihnout účinnost potenciálové metody, která narozdíl od diagramu síly neklamně v obou odlišných případech indikuje okamžik nárůstu trhliny.

5. Literatura

- [1] Standard ASTM E 1820 - 01: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness (ASTM, June 2001)
- [2] Grantový projekt č. 101/03/0731: Predikce J-R křivek, plastických a lomových nestabilit s užitím konstitutivních relací na bázi dutinových modelů (hlavní řešitel doc. ing. V. Laš, CSc, ZČU Plzeň)
- [3] Korec, L. – Jaroš, P.: Měřicí metoda pro sledování plastické a creepové deformace při provozních podmínkách (ISBN 80-214-2576-8) (Sborník 13. konference "Kotle a energetická zařízení 2004")