

## URČENÍ SOUČINITELE INTENZITY NAPĚTÍ V ROTUJÍCÍM OHÝBÁNĚM HŘÍDELÍ

Ing. Rudolf Řezníček Výzkumný ústav kolejových vozidel

Ing. Josef Vísner, ČSC Škoda k.p. Plzeň

### 1. Fotoelasticimetrické určení hodnot $K$

Pokud se týče experimentálních metod, nejvíce je propracováno fotoelasticimetrické určování součinitele intenzity napětí (dále  $K$ ) využívající metody napěťového zmrazování epoxidových modelů. Většina dosud vypracovaných metod pro stanovení hodnot  $K_I$  a  $K_{II}$  z naměřených fotoelasticimetrických veličin vychází z tzv. singulárního tvaru rovnic Westergaardových [1] upravených Irwinem. Odlišný přístup, odvozený původně pro výpočet  $K_T$  [2] a později i pro určování  $K_I$  a  $K_{II}$  [3][4][5] využívá třetí z rovnic [1] určující  $\tau_{xy}$ , s uplatněním vztahů Wertheimova zákona. Řešení podle této tzv. metody smykových napětí je jednoduché a hodnoty  $K_I$  a  $K_{II}$  získané statistickým vyhodnocením mnohabodového měření mají rozptyl, který souvisí s rozdílem mezi přesným a singulárním tvarem rovnice pro  $\tau_{xy}$  [1] v uvažovaných bodech měření a s přesností měření úhlů izoklín.

### Experimentální materiál, vzorky a zařízení

Bylo odlito celkem 5 ks modelů hřídelů (označení H1 až H5), jejichž rozměry po vyvrtání děr a odřezání čel jsou uvedeny na obr.1. Forma byla zhotovena jako ocelová rozkládací s vnitřní vrstvou ze silikónového kaučuku. Modely H1 až H4 byly odlity z epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 15 a model H5 z ChS Epoxy 110 vytvrzené směsí anhydridů kyseliny malainové a ftalové. Povrchové semieliptické únavové trhliny o třech velikostech (ozn. trhlina 1 až 3,  $2l_1=3, 6$  a  $8$  mm), jejichž tvar byl získán únavovým zatěžováním ohybem za rotace vzorků o průměru  $d=8$  mm, byly po zvětšení 6,25x imitovány vložení tenkých plíšků (tl.  $C, 1$  mm) do formy. Tyto plíšky byly během vytvrzování vyjmuty z formy tak, aby zůstal zachován tvar a velikost trhlín v modelu. Vytvrzování a napěťové zmrazování bylo prováděno v peci (horkovzdušný sterilizátor) s automatickou regulací příslušných teplotních režimů. Zatěžování modelu prostým ohybem bě-

hem napětového zmrázování bylo provedeno pomocí přípravku s horním a spodním vahadlem. Závaží se upevňovalo po vytemperování modelu na napětovo-zmrázovací teplotě (na cca 138°C) na ocelové lanko upevněné k spodnímu vahadlu a vyvedené malým otvorem ze spodku pece. Napětovo-zmrazené modely byly v zvolených místech (viz obr.1) rozřezány pomocí kotoučové rozbrušovací soupravy za intenzivního chlazení vodou, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění výřezů. Výřezy byly odebírány vždy ve směru kolmém na čelo dané trhliny. Hodnoty optické konstanty  $k_{\theta}$  byly u jednotlivých modelů H1 až H5 zjištěny běžně používanou metodou měření řádů izochromát ve středu napětově-zmrazených zkušebních kotoučů, které byly odebrány z čel modelů.

Měření fotoelasticitrických veličin, tj. řádů izochromát a úhlů izoklín v zvolených bodech, bylo provedeno na polariskopu Vishay 051, který je vybaven optickým systémem promítajícím obraz z výřezu na obrazovku s desetinasobným zvětšením. Fotografování interferenčních pruhů s vynásobenými řády izochromát bylo provedeno u všech výřezů na polariskopu Vishay 060.

### Způsob vyhodnocení experimentů

K určení hodnot  $K_I$  a  $K_{II}$  v zvolených bodech po obvodě čel jednotlivých trhlin byla použita uvedená metoda smykových napětí vycházející z rovnice

$$\left(\frac{r}{2}\right)^2 \sin 2\alpha \frac{m}{t} k_{\theta} = K_I \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} - K_{II} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \quad (1)$$

kde  $r$  je poloměr daného bodu na izochromátě v polárních souřadnicích,  $\theta$  je polární úhel tohoto bodu,  $m$  je řád izochromát,  $\alpha$  je úhel izoklín a  $t$  je tloušťka výřezu. Pro určení neznámých  $K_I$  a  $K_{II}$  je možno dosadit do rovnice (1) naměřené fotoelasticitrické veličiny dvou bodů A, B umístěných vždy na opačných poloosách osy  $y$  (viz obr.2). Po dosazení za  $\theta_A = \pi/2$  a  $\theta_B = -\pi/2$  dojde k zjednodušení rovnice (1). Uvedená metoda smykových napětí byla potom použita k počítačovému vyčíslení hodnot  $K_I$  a  $K_{II}$  a to vždy u dvou různých kombinací různých bodů  $A_1, B_1$ . Takto bylo vypočítáno u všech výřezů 16 až 36 hodnot  $K_I$  a  $K_{II}$ . Z těchto byl potom určen střední aritmetický průměr a střední kvadratická odchylka.

### Výsledky experimentů

Střední aritmetické průměry hodnot  $K_I$  (označené  $\bar{K}_I$ ) získané uvedeným způsobem jsou včetně svých středních kvadratických

odchylek uvedeny na obr.4. Současně počítačově získané střední hodnoty  $K_{II}$  byly o dva až tři řády menší než střední průměry  $K_I$  nebo byly záporné, proto byly zanedbané a nejsou uvedené. Protože při prostém ohybu a kolmém umístění rovin jednotlivých trhlin na vektory ohybového napětí nastává pouze I. typ zatížení trhliny (Mode I), byl výskyt těchto malých hodnot  $K_{II}$  způsoben příčnou posouvací silou od vlastní hmotnosti modelu a to v řezech A-A a C-C (viz obr.1) a dále technickou nemožností absolutně kolmého umístění roviny tenkých plíšků imitujících trhliny na podélnou osu modelu a to především u největší trhliny 3.

Na obr.3 je uveden průběh hodnot geometrického faktoru součinitele intenzity napětí  $F(g)$  v kořeni jednotlivých nenatočených trhlin ( $\gamma=90^\circ$ ) platných po přepočtu koeficienty  $k_I$  a  $k_{II}$  pro ocelovou tyč. Koeficient  $k_I$  slouží k přepočtu výpočtových hodnot získaných z rovnic [1] předpokládajících rovinnou napjatost v blízkosti hrotu trhliny na hodnoty platné pro skutečnou prostorovou napjatost ( $k_I=(1-\nu_e^2)^{1/2}$ ) a koeficient  $k_{II}$  k přepočtu rozdílných Poissonových poměrů epoxidového materiálu  $\nu_e$  a ocele  $\nu_o$  ( $k_{II}=(1-\nu_e^2/1-\nu_o^2)^{1/2}$ ). Amplituda ohybového napětí na modelu je označena  $\sigma_{oM}$ . Na obr.4 jsou hodnoty  $K_I$  označeny rozkmitem, tj.  $\Delta K_I$  přičemž zde bylo použito dnes již v zahraničí běžné označování, uvažující při sinusovém střídavém zatěžování resp. při namáhání ohybem za rotace pouze tahovou část cyklu napětí. Dále je možné uvést, že hodnoty  $\Delta K_I$  uvedené na obr.4 jsou hodnoty získané na epoxidových modelech a je možné je převést na hodnoty platné pro ocelovou tyč kruhového průřezu pomocí obecného vztahu

$$\frac{K_D}{k_I k_M K_M} = \left( \frac{\sigma_D}{\sigma_M} \left( \frac{l_D}{l_M} \right) \right)^{1/2} \quad (2)$$

kde  $K_D$  a  $K_M$  je součinitel intenzity napětí na díle a na modelu,  $\sigma_D$  a  $\sigma_M$  je napětí na díle a na modelu,  $l_D$  a  $l_M$  je charakteristický rozměr díla a modelu (zde průměr tyče).

## 2. Diskuze výsledků

Jak vyplývá z grafického znázornění hodnot  $\Delta K_I$  na obr.4, rotující trhlina jsou vystaveny v poli ohybového napětí složitým průběhům  $\Delta K_I$  v jednotlivých bodech po obvodě jejich čel.

Cílem provedených fotoelasticimetrických experimentů bylo

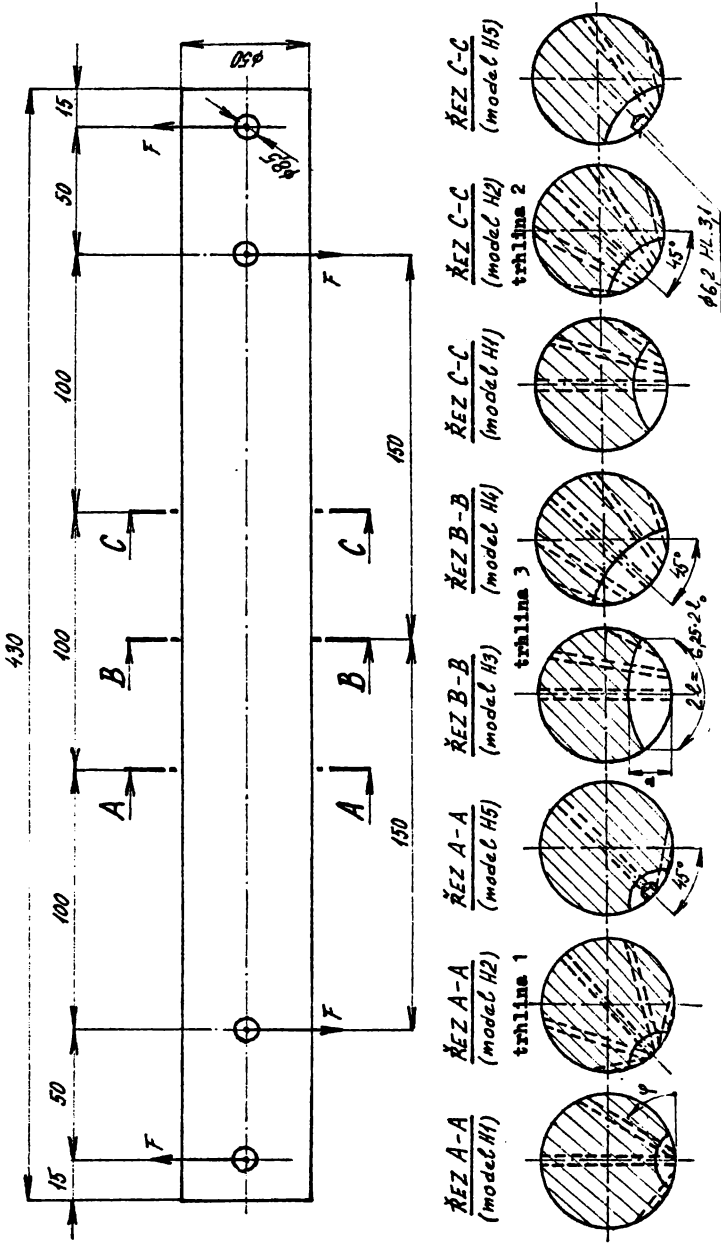
zjistit průběhy hodnot  $\Delta K_I$  po obvodě čel jednotlivých povrchových semieliptických únavových trhlin tří velikostí (viz obr. 1 a 4) o parametrech :  $a_1/d=0,12$ ,  $a_2/d=0,23$ ,  $a_3/d=0,31$ ;  $a/2l=-0,31$ , kde  $d$  je průměr tyče,  $2l$  je délka trhliny měřená po povrchu tyče (modelu) a  $a_i$  jsou hloubky jednotlivých trhlin. Dalším cílem bylo zjistit hodnoty  $F(g)$  součinitele intenzity napětí. Protože bylo zjištěno, že u středních výřezů ( $\gamma=90^\circ$ ) nastává během rotace téměř sinusový průběh hodnot  $\Delta K_I$ , byly stanoveny hodnoty  $F(g)$  v kořeni jednotlivých trhlin ( $\gamma=90^\circ$ ). Jak vyplývá z obr.3 tyto hodnoty  $F(g)$  se s rostoucí velikostí trhliny téměř nemění a je proto možné zavést zde střední hodnotu  $F(g)=0,84$ , resp. střední hodnotu  $F(g)^2=0,85$  platnou pro trhliny s primárním vrtaným vrubem (viz obr.1). Hodnota  $F(g)^2=0,85$  byla ověřena zkouškami rychlosti růstu únavové trhliny ohybem za rotace (vzorků o průměru  $d=8$  mm s primárním vrtaným vrubem průměru 1 mm a hloubce 0,5 mm) a standardních CT těles u ocelí 11 448 a O9G2S. U obou ocelí byla dosažena velmi dobrá návaznost přímkových Paris-Erdoganových závislostí  $da/dN=A\Delta K^n$  [6]

### 3. Závěr

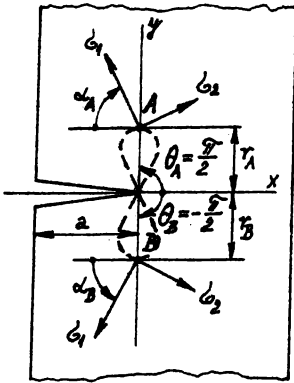
Využití uvedených experimentálně zjištěných hodnot  $\Delta K_I$  a  $F(g)_r$  resp.  $F(g)_r^2$ , dosud v literatuře neurčených, se předpokládá při stanovování odolnosti proti křehkému a únavovému porušení, při výpočtech odhadů životnosti a při stanovování kritických resp. přípustných velikostí trhlin u různých rotujících hřídelů, železničních náprav a rotačních částí namáhaných prostým ohybem a při standardizaci metodiky zkoušek rychlosti růstu únavové trhliny ohybem za rotace.

### Literatura

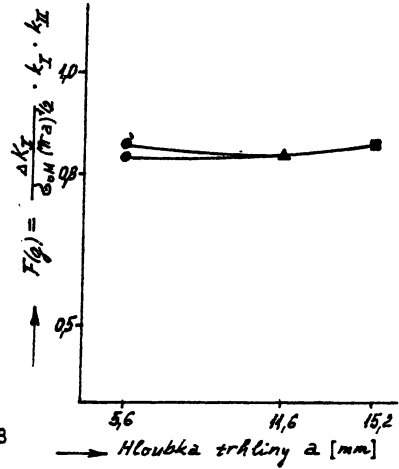
- [1] Westergaard, H.M.: "Bearing Pressures and Cracks" (Trans. Am.Soc.Mech.Engrs, Journ.of Appl. Mechcs, 1939)
- [2] Vísner, J.: Zpráva Ae5286/Dok., VVZ-R, ZES Škoda Plzeň, 1983
- [3] Vísner, J.: Zpráva Ae5110/Dok.1, VVZ-R, ZES Škoda Plzeň, 1984
- [4] Vísner, J.: Zpráva Ae624C/Dok.1, VVZ-R, ZES Škoda Plzeň, 1986
- [5] Szabó, V., Vísner, J.: Staveb. čas., 36, č.5, str.405-423, 1988
- [6] Řezníček, R.: "Lomové únavové charakteristiky svařitelných konstrukčních ocelí" (Kandidátská disertační práce, VŠMS Žilina, 1988)



Obr. 1 Rozměry modelové tyče, umístění imitovaných trhlin a odběrů vřezů.

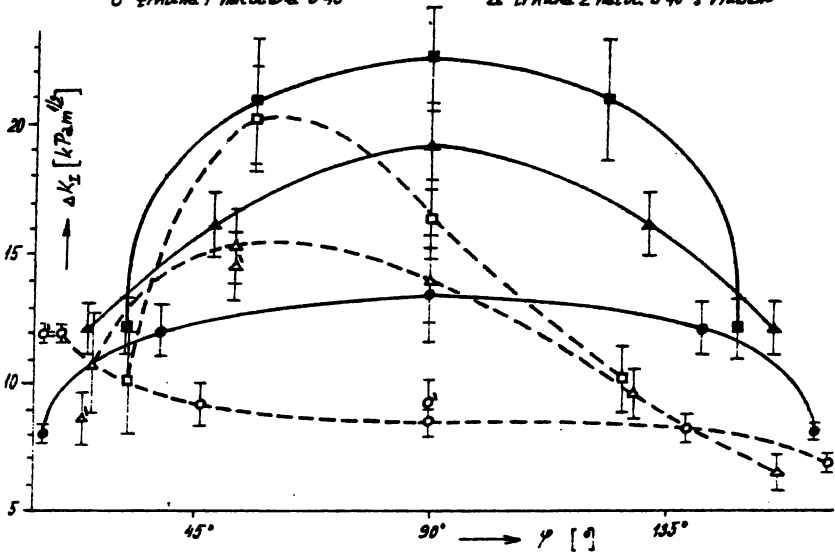


Obr.2 Souřadnice průsečíků A, B izochromát s osou y.



Obr. 3 Průběh hodnot  $F(g)$  přepočtených pro ocelovou tyč.

- trhlina 1
- ▲ trhlina 2
- trhlina 3
- trhlina 1 natočená o 45°
- trhlina 2 natočená o 45°
- ◇ trhlina 3 natočená o 45°
- trhlina 1 natoč. o 45° s vrubem
- △ trhlina 2 natoč. o 45° s vrubem



Obr.4 Průběhy hodnot  $\Delta K_I$  po obvodech čel jednotlivých trhlín