

VÝZKUM NAPJATOSTI VE VYHRDLENÍ A URČENÍ FAKTORŮ INTENZITY NAPĚTÍ K_I A K_{II} U TRHLIN VE VYHRDLENÍ TLAKOVÉ NÁDOBY

Pro návrh a hlavně bezpečný provoz tlakových nádob jaderných reaktorů VVER 1000 vyráběných v k.p. Škoda Plzeň byla třeba jak podrobná analýza napětí, tak i posouzení na pevnostní porušení s ohledem na přechodové a havarijní režimy. V rámci spolupráce SVUŠS Praha se ZES Bolevec bylo v první fázi provedeno experimentální ověření výpočtu napjatosti ve specifickém vyhrdlení této nádoby [1]. Při výpočtu vypracovaném v ÚSTARCH-SAV i při experimentu (zmrazovací prostorová fotoelasticimetrie) byly použity zjednodušené modely ve tvaru čtvercové desky s centrálně umístěným vyhrdlením, zatížené v rovině desky ve dvou kolmých směrech napětími σ_1 a σ_0 v poměru 2 : 1 tak, jak odpovídá membránové napjatosti v tenkostěnném válci (obr. 1). Stanoveny byly průběhy meridiálních a obvodových napětí na "vnějším" i "vnitřním" povrchu ve dvou hlavních řezech modelu pro jmenovitý přetlak 1 MPa. Kromě toho byly určeny také koeficienty koncentrace napětí vztažené na tečné napětí v hladké části stěny nádoby.

Jak bylo uvedeno v referátu Ing. Vísnera na konferenci EAN 89, výsledky našich měření i měření na modelech nádob provedených v ZES Bolevec potvrdily správnost provedených výpočtů.

V další fázi byly stejnou experimentální metodou určeny faktory intenzity napětí K_I a K_{II} pro daný konkrétní tvar vyhrdlení, trhliny i zatížení. Celkem byly proměřeny 3 modely s obloukovými trhlínami jmenovitých délek $a = 4,5; 6,5$ a 10 mm, natočených vzhledem ke kladné ose x' základního souřadného systému modelu $x'y'$ o úhel $\alpha = 0^\circ$ a -135° .

Pro vyhodnocení K_I a K_{II} byla použita metoda smykových napětí vypracovaná v ZES Bolevec [2] na základě Westergaadem odvozené a Irwinem upravené přibližné rovnice pro smykové napětí v okolí špičky trhliny obecně orientované uprostřed nekonečné desky zatížené rovinnou napjatostí (obr. 2).

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (1)$$

S pomocí rovnic pro rovinnou napjatost

$$\tau_{\max} = \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{\max} \cdot \sin 2\alpha \quad (3)$$

a Wertheimova zákona platného ve fotoelasticimetrii

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau_{\max} = \frac{m}{t} k_{\sigma} \quad (4)$$

kde m ... řád izochromat
 α ... parametr izokliny
 k_{σ} ... optická citlivost materiálu
 t ... tloušťka výřezu s trhlinou,

lze určit hledané veličiny K_I a K_{II} ze dvou rovnic typu

$$\sqrt{\frac{\pi r}{2}} \sin 2\alpha \left(\frac{m}{t} \right) k_{\sigma} = K_I \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \\ + K_{II} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (5)$$

Měření bylo pro zjednodušení výpočtu provedeno na mno-
 žině dvojic bodů určených souřadnicemi (r_i, θ_i) a (r_k, θ_k) , $i \neq k$
 ležících symetricky na polopřímkách určených počátkem v čele
 trhliny a svírajících s osou x úhly $\theta_1 = \pi/2$ a $\theta_2 = -\pi/2$.
 Umístění trhlín ve vyhrdlení a výřezů pro vyhodnocení fakto-
 rů intenzity napětí je na obr. 3. Měření byla provedena v
 polariskopu fy Vishay typu 051.

Hodnoty faktorů intenzity napětí s využitím metody smy-
 kových napětí se pak určí z rovnic

$$K_I = k_{\sigma} \sqrt{\pi} \left[\sqrt{r_k} \sin 2\alpha_k \left(\frac{m}{t} \right)_k - \sqrt{r_i} \sin 2\alpha_i \left(\frac{m}{t} \right)_i \right] \\ K_{II} = k_{\sigma} \sqrt{\pi} \left[\sqrt{r_i} \sin 2\alpha_i \left(\frac{m}{t} \right)_i + \sqrt{r_k} \sin 2\alpha_k \left(\frac{m}{t} \right)_k \right] \quad (6)$$

Pro tyto výpočty byly použity body v intervalu

$$0,05 < \frac{r}{a} < 0,2 \quad (7)$$

Kromě tohoto způsobu byla pro vyhodnocení K_I a K_{II} po-
 užita také zpřesněná metoda smykových napětí [3], která
 umožňuje získat dobré výsledky i na základě měření mimo ob-
 last určenou nerovností (7). Obecné vztahy pro jejich určení
 jsou

$$K_I = \frac{H_i T_k - H_k T_i}{H_i G_k - H_k G_i} \quad K_{II} = \frac{G_k T_i - G_i T_k}{H_i G_k - H_k G_i} \quad (8)$$

kde

$$\begin{aligned}T &= \sqrt{a \pi} \frac{m}{t} k_{\sigma} \sin 2\alpha \\G &= \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \theta \cos \frac{3\theta}{2} \\H &= \sqrt{\frac{2a}{r}} \cos \frac{\theta}{2} - \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2}\end{aligned} \quad (9)$$

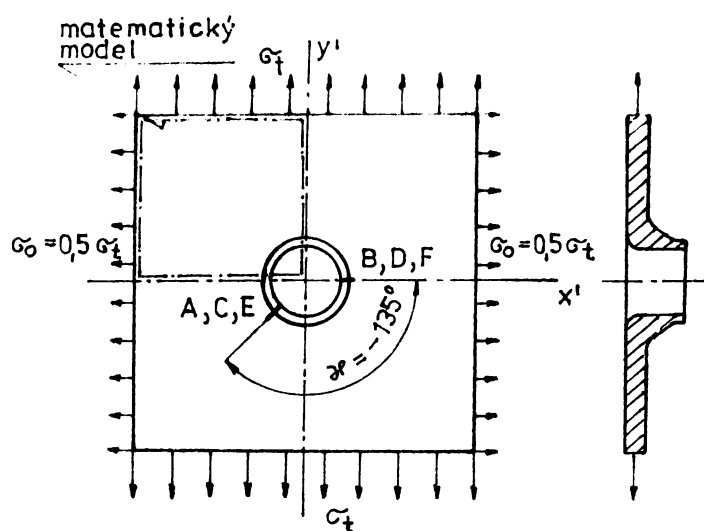
Pro zvýšení přesnosti bylo měření provedeno v 15-ti dvojicích bodů a výsledky statisticky zpracovány. U obou metod byly určeny jejich střední hodnoty a směrodatné odchylky. Při vyhodnocování zpřesněnou metodou byly výsledky zpracovány také metodou nejmenších čtverců. Výpočty byly provedeny na počítačích Sharp PC-1500 A a GA 16/220.

Měření ukázalo, že při daném tvaru modelu a jeho zatížení jsou faktory intenzity napětí K_I jak u trhlin orientovaných kolmo na směr většího napětí, tak u trhlin odkloněných od tohoto směru o $\pi/4$ zanedbatelně malé a dominující význam mají hodnoty součinitele K_I .

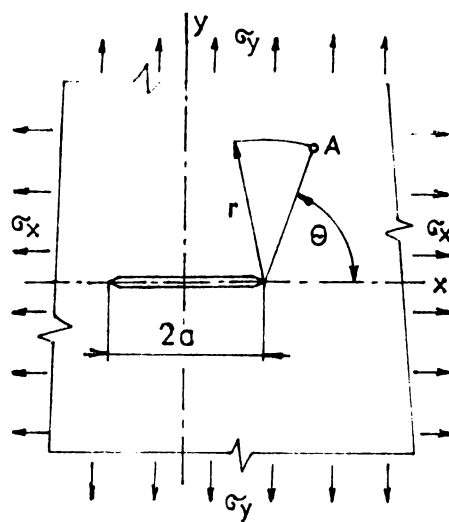
Měření plně prokázalo důležitost dodržení nerovnosti (7) při použití nezpřesněné metody smykových napětí. Mimo tuto oblast velmi rostou směrodatné odchylky vlivem zvětšujícího se rozptylu výsledků. Při použití zpřesněné metody bylo možno tyto hranice značně překročit, aniž se přesnost měření podstatně snižovala. Toto je velmi důležité, neboť tato skutečnost umožňuje s dostatečnou přesností určovat faktory intenzity napětí i pomocí méně dokonalých polariskopů, protože není nutno měřit v tak těsné blízkosti čela trhliny. Na obr. 4 jsou zobrazeny zjištěné hodnoty faktorů intenzity napětí K_I .

Seznam literatury: /1/ TRUHLÁŘ J. - Analýza napjatosti ve vyhrdlení tlakové nádoby jaderného reaktoru VVER 1000, výzk. zpráva SVÚSS 89-02001, Praha 1989
/2/ VÍSNER J. - Fotoelasticimetrické metody zjišťování smíšeného součinitele intenzity napětí K_I a K_{II} , Sborník 23.konf. EAN, 1985
/3/ SZABO V., VÍSNER J. - Určovanie KIN metódou šmykových napätí, Stavebnický časopis č.8, Bratislava, 1988
/4/ TRUHLÁŘ J. - Určení K_I a K_{II} u trhlin ve vyhrdlení tlakové nádoby jaderného reaktoru VVER 1000, výzk.zpráva SVÚSS 89-02029, Praha, 1989

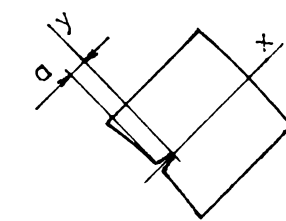
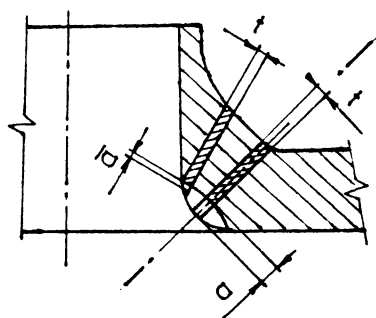
Ing.Jaroslav Truhlář - SVÚSS, 190 11 Praha 9-Běchovice
Ing.Josef Vísner, CSc. - ZES Bolevec, 316 00 Plzeň



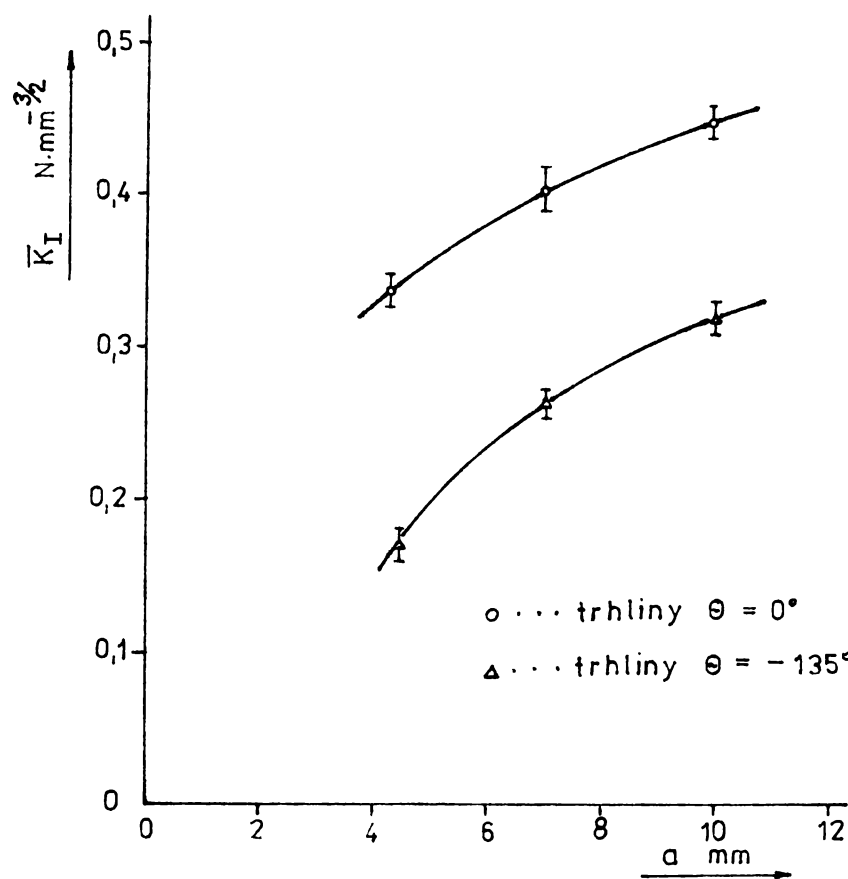
obr. 1



obr. 2



obr. 3



obr. 4