EAN 93
31. konference o experimentální analýze napětí
25.-27.5.1993 Měřín ČESKÁ REPUBLIKA

RESIDUAL STRESS EVALUATION IN CASE OF THE HOLE-DRILLING METHOD APPLICATION AND PLASTIC STRAIN OCCURRENCE

VYHODNOCENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ PŘI APLIKACI NAVRTÁVACÍ METODY A VÝSKYTU PLASTICKÉ DEFORMACE

Dolhof V.

The paper describes methods of residual stress evaluation in the elastic area and in the case of a partial plastic strain occurrence in measured data. Further results of experimental verification on a flat laboratory specimen are mentioned.

1. Vyhodnocení zbytkových napětí v oblasti pružných deformací

Semidestruktivní navrtávací metoda určování zbytkových napětí je nejrozšířenější metodou užívanou v technické praxi. Princip metody spočívá v nalepení speciální tenzometrické růžice na zkoumaný předmět, změření nulových čtení tenzometrů ve směrech 0°, 45^oa 90°, odvrtání otvoru do hloubky rovné průměru otvoru buď najednou anebo po stupních s následným měřením čtení tenzometrického můstku. Z rozdílu těchto čtení obdržíme poměrné deformace ε_a, ε_b, ε_c, které odpovídají změně stavu napjatosti.

Pokud zbytková napětí nepřekročí hodnotu cca 60 % meze úměrnosti materiálu součásti, lze jejich výpočet v souladu s normou ASTM E 837-89 uskutečnit podle vztahu .

$$\sigma_{1,2} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{4A} \pm \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}. \quad (1)$$

Konstanty A,B vypočteme ze vztahů

$$A = -\frac{1+\mu}{2E} \cdot \bar{a}, \quad B = -\frac{1}{2E} \cdot \bar{b}.$$

kde $\bar{a}$, $\bar{b}$ jsou konstatnty odvozené ze Schajerovy studie závislosti uvolněného napětí po hloubce vrtacího otvoru.

Úhel natočení hlavních napětí $\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arc\,tg} \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c}$ [°] (2)

je vztažen ke směru ε_a a kladný smysl je proti směru otáčení hodinových ručiček.

2. Vyhodnocení zbytkových napětí při výskytu podílu plastických deformací

V případě, že zbytková napětí překročí hodnotu 60 % meze úměrnosti materiálu součásti, vyskytuje se vlivem koncentrace napětí v okolí vrtaného otvoru větší podíl plastické deformace a vyhodnocené hodnoty podle vztahů (1), (2) jsou fiktivní napětí $\sigma_{1,2\,FIKT.}$

Pro stanovení hodnoty skutečného napětí $\sigma_{1,2\,SKUT.}$, musí být určena elastická deformace $\varepsilon_{1,2}$ z celkové naměřené deformace $\varepsilon_{1,2\,CELK.}$ eliminováním podílu plastické deformace $d\varepsilon_{1,2\,PLAST.}$ Hodnoty $\varepsilon_{1,2\,CELK.}$ při zanedbání vlivu malého otvoru vypočteme podle $\varepsilon_{1,2\,CELK.} = \frac{1}{E}\left[\sigma_{1,2\,FIKT.} - \nu\,\sigma_{2,1\,FIKT}\right]$. (3)

Plastický podíl $d\varepsilon_{1\,PLAST.}$, vyjádřený s využitím MKP jako funkce poměru hlavních napětí σ_2/σ_1 a podílu srovnávacího napětí a meze úměrnosti σ_i/R_e, lze lineární aproximací přibližně určit podle vztahu

$$d\varepsilon_{1\,PLAST.} = \left[(0{,}183 + 0{,}05\,\sigma^x)\frac{\sigma_i}{R_e} - (0{,}1 + 0{,}02\,\sigma^x)\right]\varepsilon_{1\,CELK.} \qquad (4)$$

kde

$$\left.\begin{aligned} \sigma^x &= \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \quad \text{když} \quad |\sigma_2| < |\sigma_1| \\ \sigma^x &= \frac{\sigma_1}{\sigma_2}, \quad \text{když} \quad |\sigma_2| > |\sigma_1| \end{aligned}\right\} \text{ platí pro } \frac{\sigma_i}{R_e} > 0{,}6$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2}$$

Obecně lze přírůstek poměrné deformace vyjádřit výrazem

$$d\varepsilon_j = d\varepsilon_{j\,el.} + d\varepsilon_{j\,PLAST.} \qquad (5)$$

Podle tenzorové formulace teorie plasticity platí, že objemová deformace je úměrná střednímu napětí, dále že složky derivátoru přírůstků plastických deformací jsou přímo úměrné derivátorům napětí a že intenzita napětí je funkcí integrálu z přírůstků plastických deformací a nezávisí na typu napjatosti. Po úpravě obdržíme pro přírůstek plastické deformace vztah

$$d\varepsilon_{j\,PLAST.} = d\lambda\,(\sigma_j - \sigma_s) \qquad (6)$$

kde $d\lambda = \frac{3}{2}\,\frac{d\varepsilon_{i\,PLAST.}}{\sigma_i}$ a $\sigma_s = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$,

Po dosazení a úpravě dostaneme Prandtl-Reussovy vztahy pro jednotlivé složky přírůstků plastické deformace

$$d\varepsilon_{1PLAST.} = \frac{2}{3}\, d\lambda \left[\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3)\right] \tag{7}$$

$$d\varepsilon_{2PLAST.} = \frac{2}{3}\, d\lambda \left[\sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\right]. \tag{8}$$

Z těchto vztahů obdržíme pro rovinný stav napjatosti $(\sigma_3 = 0)$

$$d\varepsilon_{2PLAST.} = \frac{2\sigma^x - 1}{2 - \sigma^x} \cdot d\varepsilon_{1PLAST.} \tag{9}$$

Potom pro výpočet pružné deformace platí

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1CELK.} - d\varepsilon_{1PLAST.} \tag{10}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{2CELK.} - \frac{2\sigma^x - 1}{2 - \sigma^x} \cdot d\varepsilon_{1PLAST.} \tag{11}$$

Skutečná napětí lze potom určit pomocí rozšířeného Hookeova zákona

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1 - \mu^2}\left(\varepsilon_{1,2} + \mu\, \varepsilon_{2,1}\right). \tag{12}$$

Metodika vyhodnocení podle MPA Universita Stuttgart předpokládá vyjádření navržených deformací $\varepsilon_{a,b,c} = f(\xi)$, t.j. poměru hloubky z k ø vrtaného otvoru D_0. Hodnotu gradientu deformace lze vyjádřit

$$\frac{d\varepsilon_{a,b,c}}{d\xi} = \varepsilon'_{a,b,c}. \tag{13}$$

Kalibrační křivku uvolňování deformace lze aproximovat polynonem 5.stupně

$$\varepsilon_t = a_0 + a_1\xi + a_2\xi^2 + a_3\xi^3 + a_4\xi^4 + a_5\xi^5 \tag{14}$$

Po derivaci $\varepsilon'_t = a_1 + 2a_2\xi + 3a_3\xi^2 + 4a_4\xi^3 + 5a_5\xi^4.$ (15)

Transformované deformace $\bar{\varepsilon}_{a,b,c} = \dfrac{\varepsilon'_{a,b,c}}{\varepsilon'_t} = f(\sigma_{1,2}\,;\,\xi)$ (16)

Hlavní deformace podle Mohrovy kružnice

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\bar{\varepsilon}_a + \bar{\varepsilon}_c}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\bar{\varepsilon}_a - \bar{\varepsilon}_b)^2 + (\bar{\varepsilon}_c - \bar{\varepsilon}_b)^2}. \tag{17}$$

Fiktivní hlavní napětí vypočteme podle vztahu (12) a úhel natočení φ podle vztahu (2). Dále uvedeným způsobem určíme skutečná hlavní zbytková pnutí s využitím vztahů (4) až (12).

Korigovaný úhel natočení skutečných napětí vypočteme opět podle vztahu (2) při dosazení korigovaných poměrných deformací bez podílu plastické deformace, které můžeme vyčíslit podle

$$\begin{aligned} \varepsilon_{aK} &= \overline{\varepsilon}_{aCELK.} - d\varepsilon_{1PLAST.}\cos\varphi - d\varepsilon_{2PLAST.}\sin\varphi \\ \varepsilon_{bK} &= \overline{\varepsilon}_{bCELK.} - d\varepsilon_{1PLAST.}\cos(45^\circ-\varphi) - d\varepsilon_{2PLAST.}\sin(45^\circ-\varphi) \\ \varepsilon_{cK} &= \overline{\varepsilon}_{cCELK.} - d\varepsilon_{1PLAST.}\sin\varphi - d\varepsilon_{2PLAST.}\cos\varphi \end{aligned} \quad (18)$$

3. Experimentální ověření

Pro experimentální ověření metodiky vyhodnocování byl užit plochý vzorek o průřezu 45 x 6 mm z materiálu ČSN 11458 s mezí $R_{p0,2}$ = 371 MPa, namáhaný tahem. Pro přehlednost jsou výsledky vyhodnocení uvedeny v tabulce.

		σ_1[MPa]	σ_2[MPa]	φ[°]	$\sigma_{1MET}/\sigma_{1EXP.}$
	Zatížení vzorku	300,4	0	0	-
1	Metoda pro oblast elast.defor.	509,9	-68,9	7,837	1,697
2	Metoda pro oblast elastoplast.def.	371,6	-19,4	7,837	1,237
3	Metoda MPA Universita Stuttgart	344,2	-25,3	7,632	1,146

Běžně užívanou metodou 1 pro oblast elastických deformací obdržíme nepoužitelná fiktivní napětí vyšší než mez pevnosti materiálu (R_m = 499 MPa). Nově ověřované metody 2 a 3 respektují výskyt podílu plastických deformací a poskytují výsledky využitelné v praxi.

Václav Dolhof/Ing.CSc.
ŠKODA, VÝZKUM, Plzeň, s.r.o./Tylova 57,316 00 Plzeň
Plzeň 514, linka 861/FAX 220762