

A DEVELOPMENT OF THE HOLE-DRILLING METHOD WITH AN OFF-CENTER HOLE FOR THE RESIDUAL STRESS MEASUREMENT

K. Švaříček¹, M. Vlk²

Summary: *The hole drilling method is a popular method for residual stresses measurement. This method usually assumes the centric hole within the strain gauge rosette. However, the hole is never exactly located centric with the centre of the strain gauge rosette. This paper interprets the values of the evaluated residual stresses with respecting eccentric hole and without respecting eccentric hole.*

1. Úvod

Zbytková napětí se vyskytují téměř ve všech součástech obvykle v důsledku technologických pochodů. Tato napětí mohou být užitečná nebo škodlivá. Užitečný účinek je v těch místech, kde zbytkové napětí působí opačně vzhledem k napětí od vnějšího zatížení. Tohoto účinku se docílí zejména pomocí kalení, kuličkování nebo tváření za studena. Škodlivý účinek je v těch místech, kde zbytková napětí mají stejnou orientaci jako napětí od vnějšího zatížení. V takovémto případě mohou být zbytková napětí velmi nebezpečná a je důležité znát jejich velikost – je důležité je měřit. Nejčastěji užívanou metodou pro měření zbytkového napětí je metoda vrtání otvoru. Tato metoda je založena na měření uvolněné deformace v důsledku vyvrtání malého, obvykle mělkého otvoru. Tato uvolněná deformace je úměrná hledanému zbytkovému napětí. Uvolněné deformace se nejčastěji měří pomocí tříprvkové tenzometrické růžice. Vrtaný otvor by měl být vyvrtán ve středu tenzometrické růžice. Tohoto však zcela přesně není docíleno nikdy.

Pro případ, kdy otvor je vyvrtán s podstatnou excentricitou, je nutno použít korekčních vztahů pro zohlednění této excentricity, které publikovali např. Ajovalasit (1979) nebo Wang (1988). Ovšem tyto korekce jsou vhodné pouze pro tenkou stěnu s průchozím otvorem. Z toho důvodu je vhodné použít obecnější metodu, kterou uvedl Vangi (1997), která popisuje vztah mezi uvolněnou deformací a zbytkovým napětím i pro případ excentrického otvoru. Tento postup vyhodnocování zbytkového napětí pro případ excentrického otvoru a pro tenzometrickou růžici RY 61 S firmy HBM je popsán v tomto příspěvku.

¹ Ing. Karel Švaříček: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně; Technická 2, 616 69 Brno, tel.: +420-5-41142804, e-mail: svaricek@umt.fme.vutbr.cz

² Doc. Ing. Miloš Vlk, CSc.: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně; Technická 2, 616 69 Brno, tel.: +420-5-41142886; e-mail: vlk@fme.vutbr.cz

2. Postup vyhodnocení zbytkového napětí odvrtávací metodou s excentrickým otvorem

Obecná formulace vztahu mezi uvolněnou deformací a hledaným zbytkovým napětím pro centrický i excentrický otvor může být psána ve tvaru (Vangi, 1997):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_A \\ \varepsilon_B \\ \varepsilon_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} \cdot \mathbf{a}_A^M \\ \mathbf{H} \cdot \mathbf{a}_B^M \\ \mathbf{H} \cdot \mathbf{a}_C^M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} \quad (1)$$

kde:

$$\varepsilon_A = [\varepsilon_A(z_1), \dots, \varepsilon_A(z_n)]^T \quad (2)$$

$$\varepsilon_B = [\varepsilon_B(z_1), \dots, \varepsilon_B(z_n)]^T \quad (3)$$

$$\varepsilon_C = [\varepsilon_C(z_1), \dots, \varepsilon_C(z_n)]^T \quad (4)$$

$\varepsilon_A(z_i)$, $\varepsilon_B(z_i)$, $\varepsilon_C(z_i)$ jsou uvolněné deformace měřené tenzometry A, B a C tenzometrické růžice při hloubce otvoru z_i , n je počet přírůstků hloubky otvoru.

Matice $\mathbf{H}$ je matice materiálových vlastností definovaná:

$$\mathbf{H} = [1/E \cdot \mathbf{I} \quad \mu/E \cdot \mathbf{I} \quad \mathbf{0}] \quad (5)$$

E je modul pružnosti v tahu a μ je Poissonovo číslo.

Matice $\mathbf{a}_j^M$ jsou transformované matice koeficientů:

$$\mathbf{a}_j^M = \mathbf{M}(-\alpha_j) \cdot \mathbf{a}_j \cdot \mathbf{M}(\zeta_j) \quad (6)$$

$$j \in \{A, B, C\} \quad (7)$$

Matice koeficientů $\mathbf{a}_j$ jsou ve tvaru:

$$\mathbf{a}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 & \mathbf{a}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{a}_3 & \mathbf{a}_4 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{a}_5 \end{bmatrix}_j \quad (8)$$

$$\mathbf{a}_k = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 \\ a_{12} & a_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}_k \quad (9)$$

$$k \in \{1, 2, 3, 4, 5\} \quad (10)$$

Každý koeficient z matice $\mathbf{a}_j$ (tzn. $\mathbf{a}_A$, $\mathbf{a}_B$, $\mathbf{a}_C$) musí být interpolovaný na skutečnou vzdálenost středu tenzometrické mřížky od středu otvoru R_{mj} (tzn. R_{mA} , R_{mB} , R_{mC}) dle vztahu:

$$R_{mj} = \sqrt{(e^2 + R_m^2 - 2eR_m \cos(\varphi_j - \beta))} \quad (11)$$

Úhel φ_j je natočení tenzometrických mřížek tenzometrické růžice (Obr. 1). Pro tenzometrickou růžici RY 61 S o středním poloměru $R_m = 2.55$ mm je úhel $\varphi_A = 0^\circ$, $\varphi_B = -135^\circ$ a $\varphi_C = 90^\circ$. Hodnota e je excentricita vrtaného otvoru a β je natočení excentricity.

Transformační matice $\mathbf{M}$ je dána:

$$\mathbf{M}(\delta) = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \cos(2\delta) \cdot \mathbf{I} & \sin(2\delta) \cdot \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & -\sin(2\delta) \cdot \mathbf{I} & \cos(2\delta) \cdot \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\delta \in \{\alpha_j, \zeta_j\} \quad (13)$$

Význam úhlu α_j a ζ_j je znázorněn na obr. 1. Tyto úhly mohou být stanoveny dle rovnice (14) resp (15):

$$\sin \alpha_j = \frac{e \sin(\varphi_j - \beta)}{R_{mj}} \quad (14)$$

$$\zeta_j = \varphi_j - \alpha_j \quad (15)$$

$\mathbf{I}$ je jednotková matice o rozměru n definovaná:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & 1 & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{P} = [P(z_1), \dots, P(z_n)]^T \quad (17)$$

$$\mathbf{Q} = [Q(z_1), \dots, Q(z_n)]^T \quad (18)$$

$$\mathbf{T} = [T(z_1), \dots, T(z_n)]^T \quad (19)$$

Hlavní zbytková napětí σ_I , σ_{II} a úhel jejich natočení γ od osy tenzometrické mřížky **A** proti směru chodu hodinových ručiček je dán z **P**, **Q** a **T**.

$$\sigma_{III}(z_i) = P(z_i) \pm \sqrt{Q(z_i)^2 + T(z_i)^2} \quad (20)$$

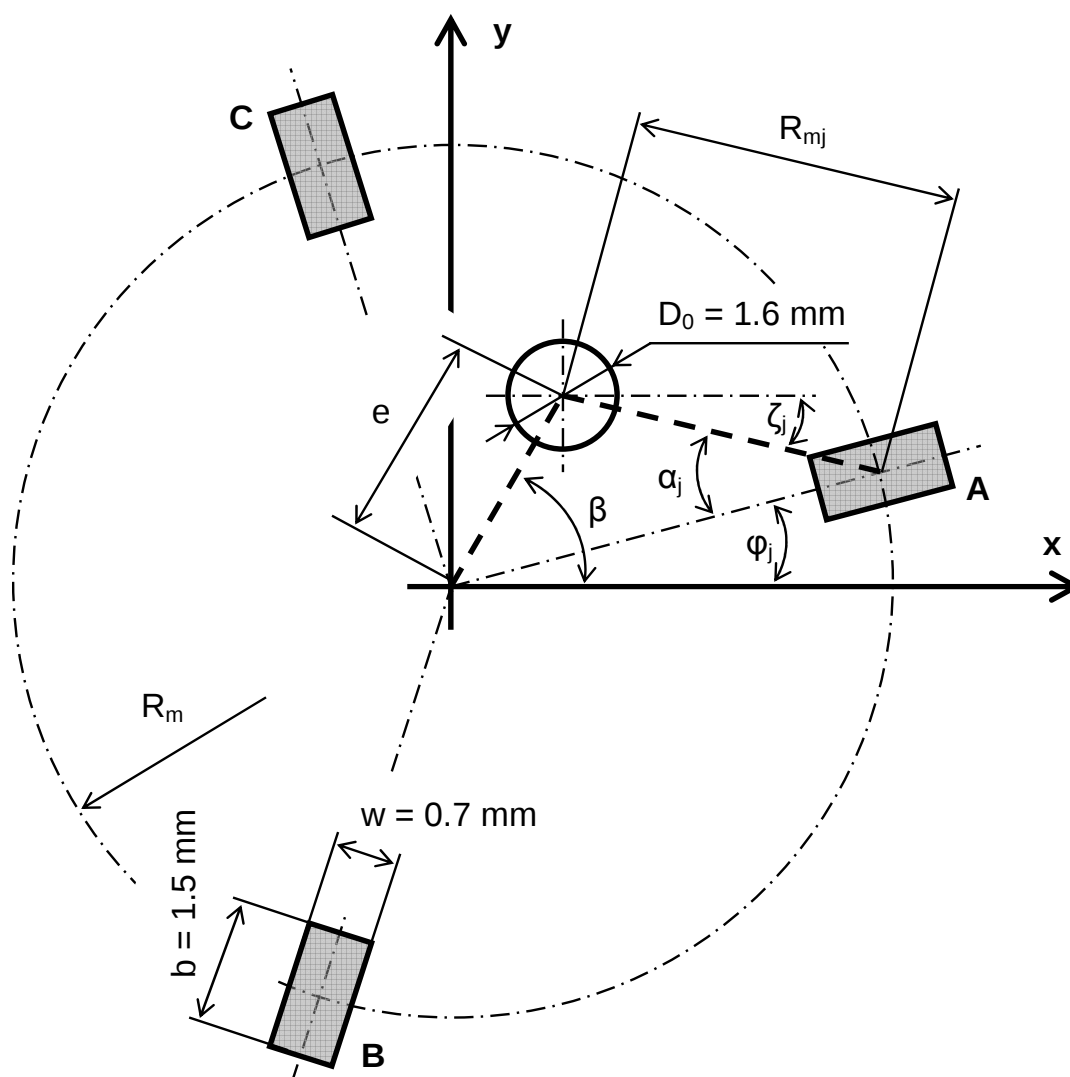
$$\gamma(z_i) = \arctan\left(\frac{T(z_i)}{Q(z_i)}\right) \quad (21)$$

Kalibrační koeficienty $a_1, a_2, \dots, a_5$ jsou koeficienty ve výrazu udávajícím vztah mezi uvolněnými napětími $\sigma_r, \sigma_t, \tau_{rt}$ a zbytkovými napětími $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ v tělese bez otvoru.

$$2\sigma_r = a_1(\sigma_x + \sigma_y) + a_2(\sigma_x - \sigma_y) \quad (22)$$

$$2\sigma_t = a_3(\sigma_x + \sigma_y) + a_4(\sigma_x - \sigma_y) \quad (23)$$

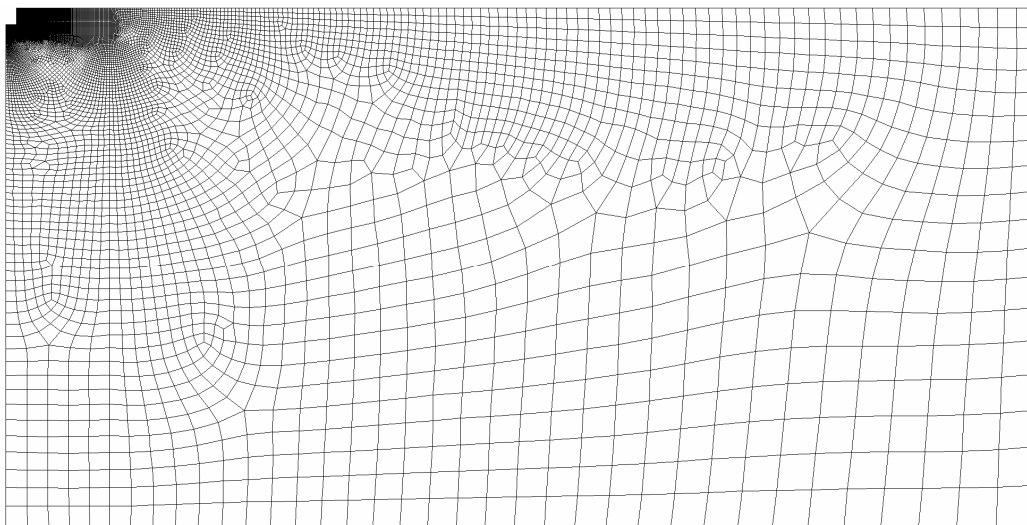
$$\tau_{rt} = a_5 \tau_{xv} \quad (24)$$



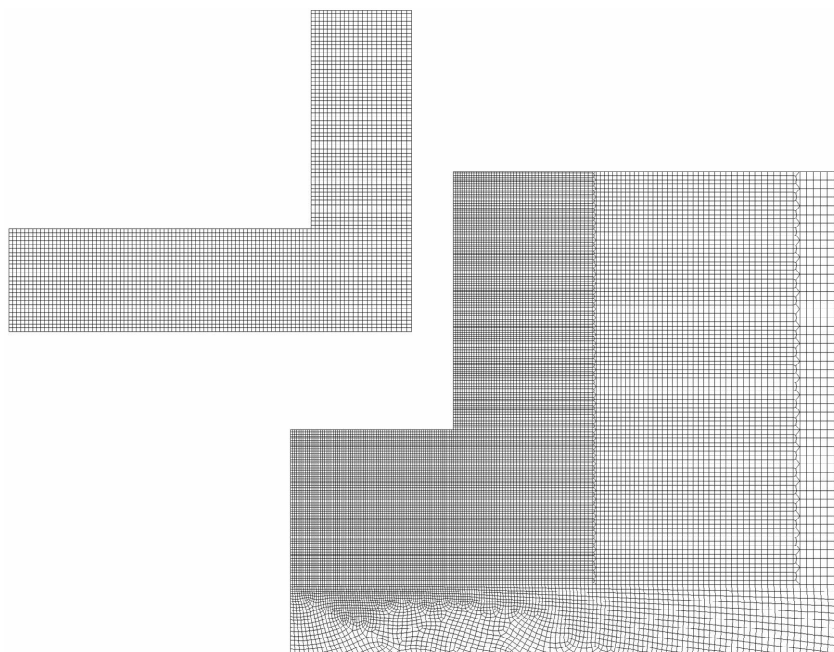
Obr. 1: Tenzometrická růžice RY 61 S; excentrický otvor

3. Určení kalibračních koeficientů

Kalibrační koeficienty byly určeny pomocí metody konečných prvků (MKP). K popisu reálného tělesa s neprůchozím otvorem byl vytvořen dvojrozměrný osově symetrický model. Tento dvojrozměrný model (obr. 2 a 3) je přijatelný při použití osově nesymetrického zatížení. Toto osově nesymetrické zatížení je realizováno za pomoci Fourierova rozvoje. Rozměry modelu byly zvoleny dostatečně velké tak, aby kalibrační koeficienty nebyly těmito rozměry ovlivněny. Průměr otvoru byl zvolen 1,6 mm a tenzometrická růžice RY 61 S. Hloubka otvoru se pohybovala od 0,255 do 1,275 mm s pěti rovnoměrnými přírůstky. Skutečná vzdálenost středu tenzometrické mřížky od středu otvoru R_{mj} byla od 2,25 do 2,85 mm s přírůstkem 0,05 mm. Materiálový model byl zvolen jako lineární, homogenní a izotropní o modulu pružnosti v tahu $E = 210$ GPa a Poissonově čísle $\mu = 0,3$. Model s těmito parametry byl vytvořen dle Švaříček (2005). Celkem bylo určeno 825 koeficientů.



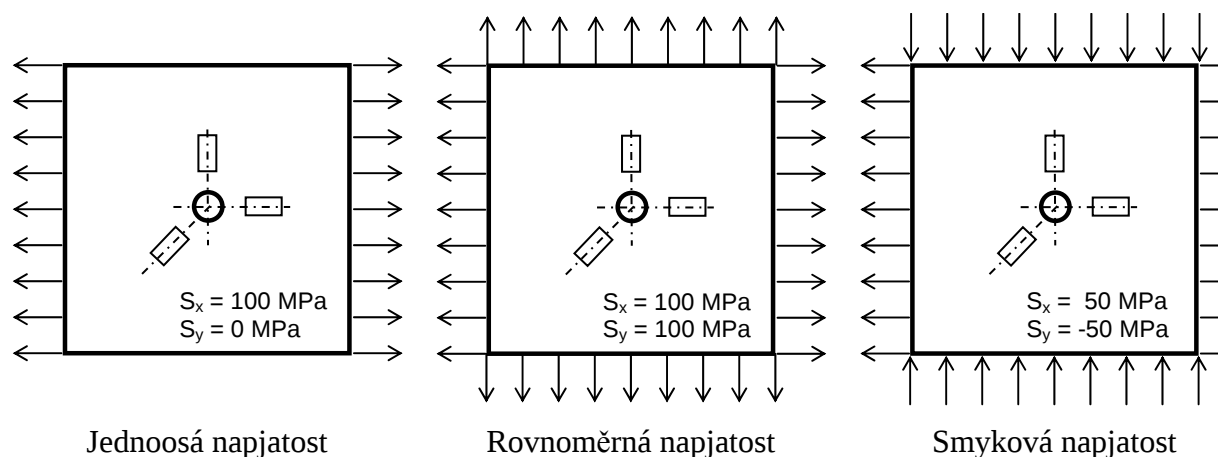
Obr. 2: Sít' modelu pro výpočet koeficientů metodou konečných prvků



Obr. 3: Detail MKP sítě

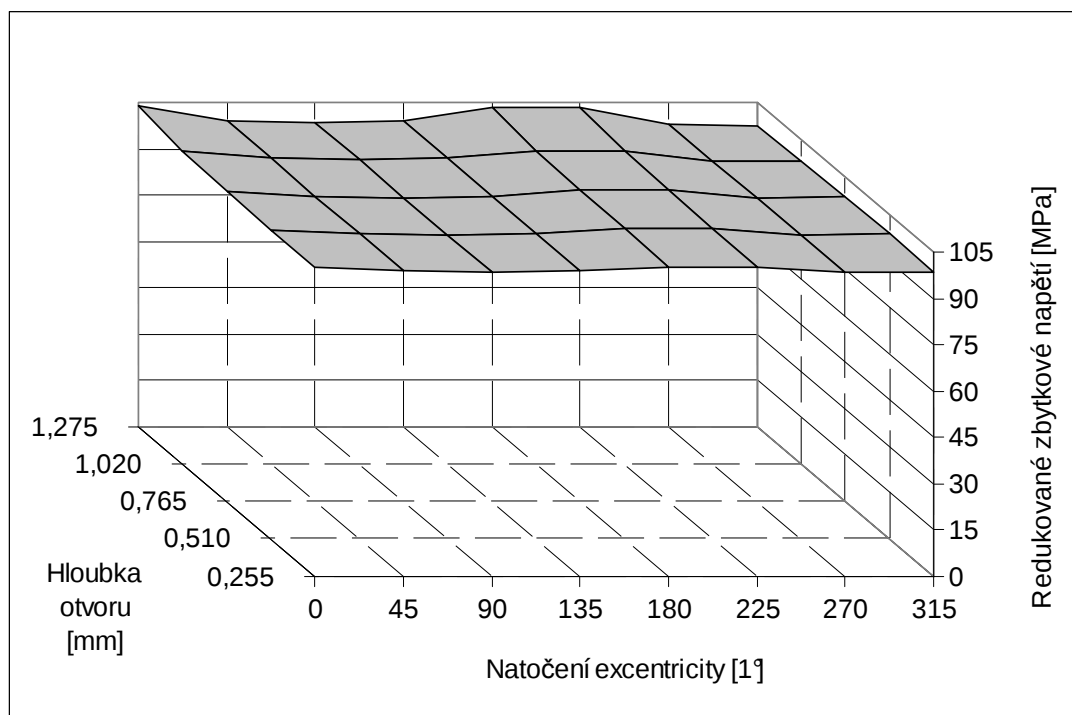
4. Vyhodnocení zbytkových napětí

Odezva tenzometrické růžice při postupném odvrtávání a simulovaném zbytkovém napětí byla vypočtena pro excentricitu o velikosti 0,2 mm. Natočení této excentricity o úhel β bylo voleno od 0 do 315 stupňů po 45 stupních. Byla simulována jednoosá, rovnoměrná a smyková zbytková napjatost (obr. 4). Redukované napětí dle max. τ bylo zvoleno pro všechny tři případy o velikosti 100 MPa. Úhel mezi hlavním napětím σ_1 a tenzometrickou mřížkou A je nulový.

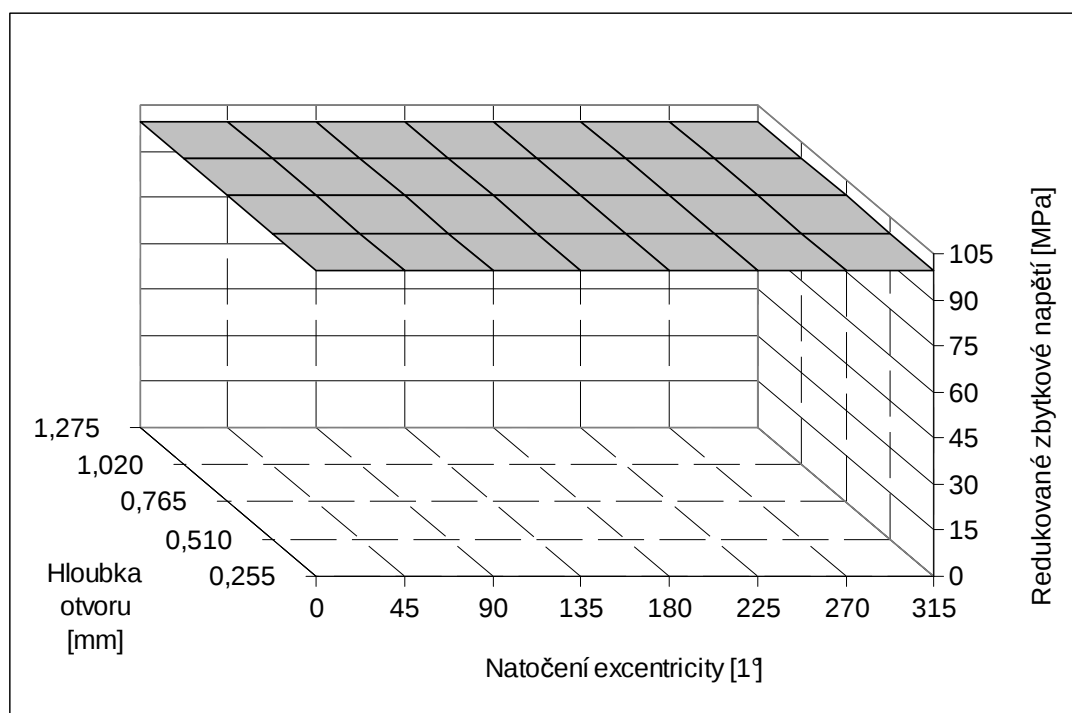


Obr. 4: Zvažované typy zbytkových napjatostí

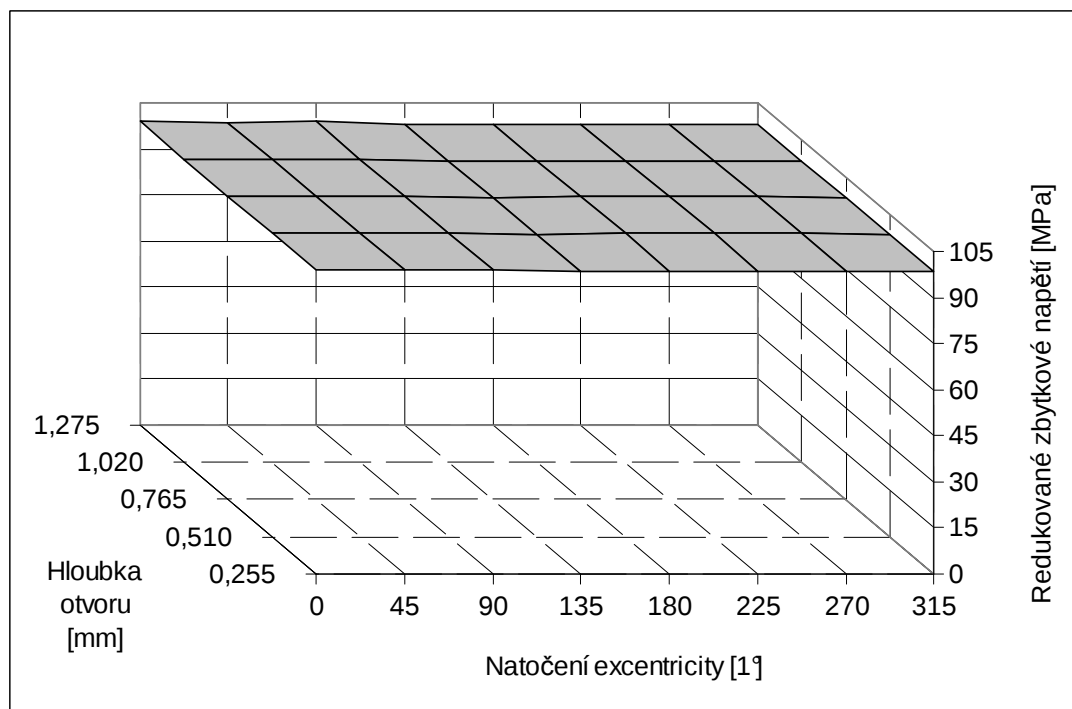
Na základě těchto simulovaných deformací jsou dle výše uvedených vztahů (1) až (21) vypočtena zbytková napětí. Výsledky těchto napětí ve formě redukovaných napětí dle podmínky max. τ pro všechny zvažované případy jsou znázorněny na obr. 5, 6 a 7. Skutečná hodnota těchto redukovaných napětí je 100 MPa.



Obr. 5: Určené redukované zbytkové napětí pro jednoosou napjatost

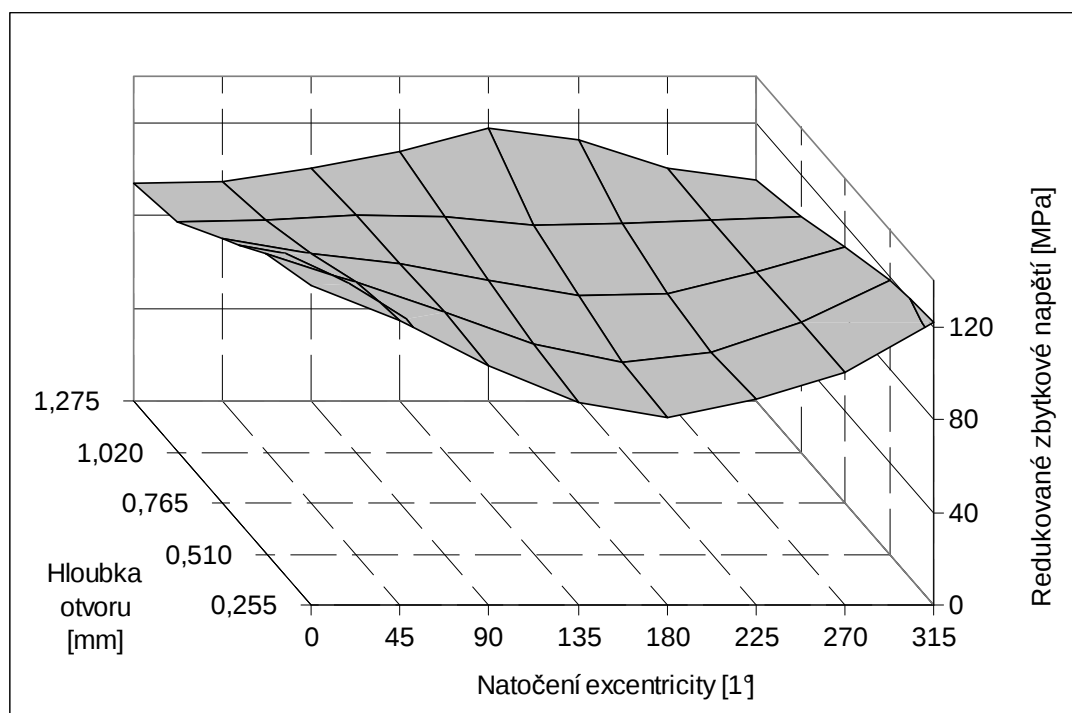


Obr. 6: Určené redukované zbytkové napětí pro rovnoměrnou napjatost

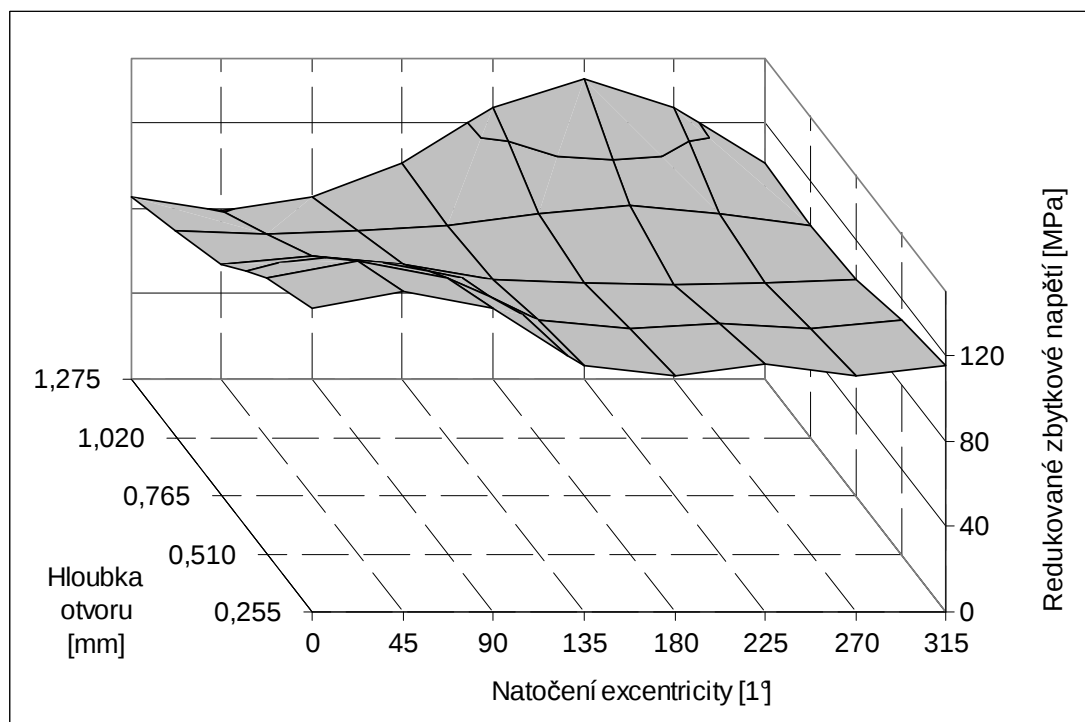


Obr. 7: Určené redukované zbytkové napětí pro smykovou napjatost

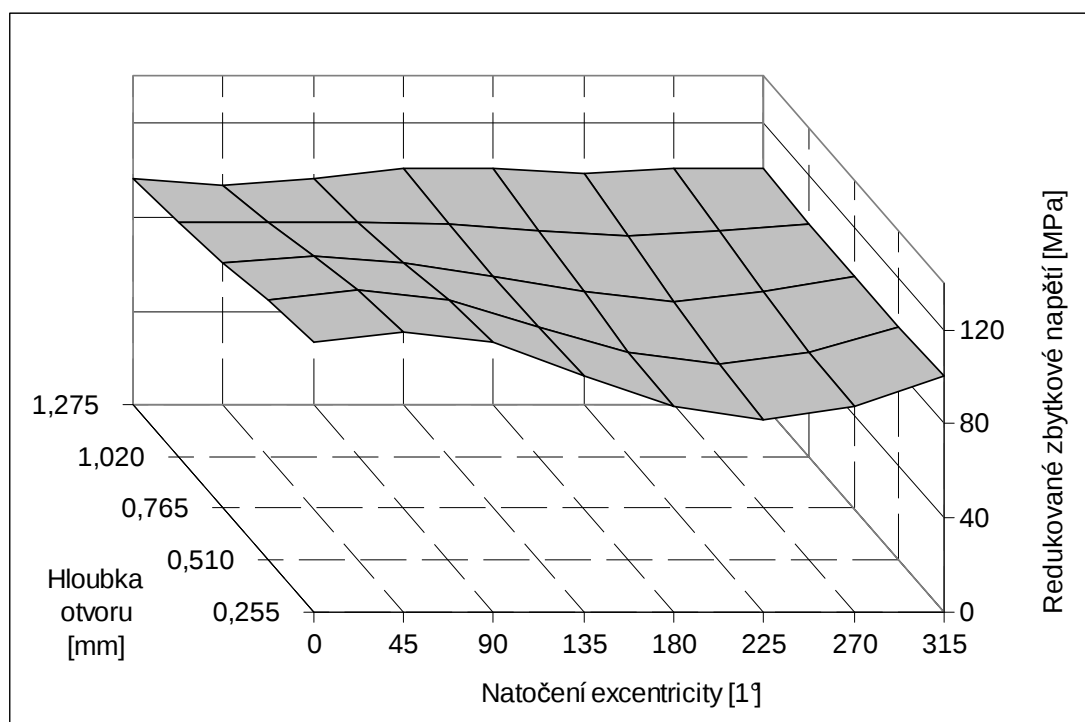
Na obr. 8, 9 a 10 jsou graficky znázorněny hodnoty určených redukovaných zbytkových napětí pro stejné uvolněné deformace jako výše ovšem bez uvažování excentricity, tzn. zbytkové napětí bylo určeno dle vztahů uvedených ve Švaříček (2003) nebo Schajer (1988).



Obr. 8: Určené redukované zbytkové napětí pro jednoosou napjatost bez uvažování excentricity



Obr. 9: Určené redukované zbytkové napětí pro rovnoměrnou napjatost bez uvažování excentricity



Obr. 10: Určené redukované zbytkové napětí pro smykovou napjatost bez uvažování excentricity

5. Závěr

V tomto článku je uveden postup výpočtu zbytkových napětí pomocí odvrtávací metody s excentrickým otvorem, který publikoval Vangi (1997). Nejprve byly vypočteny potřebné kalibrační koeficienty. Dále byla simulována uvolněná deformace pro tenzometrickou růžici RY 61 S, pro excentricitu 0,2 mm a pro jednoosou, rovnoměrnou a smykovou napjatost. Redukovaná hodnota simulovaných napětí byla 100 MPa. Zbytkové napětí bylo určeno s uvažováním excentricity, které uvedl Vangi (1997) a bez uvažování excentricity dle Schajera (1988). Maximální odchylka s uvažováním excentricity pro jednoosou, rovnoměrnou a smykovou napjatost je 4,2%, resp. 0,5%, resp. 2,3%. Maximální odchylka bez uvažování excentricity pro tři uvedené stavy zbytkových napětí je 37,8%, resp. 51,2%, resp. 19,2%. Lze tedy vidět, že pokud uvažujeme excentricitu, tak výsledky velmi dobře odpovídají skutečnosti. V opačném případě bez uvažování excentricity je vyhodnocené zbytkové napětí velmi neuspokojivé. Vangiho metoda je tedy vhodná a nezbytná pro vyhodnocování zbytkových napětí odvrtávací metodou, když excentricita otvoru je významná.

6. Literatura

- Ajvalasit, A., 1979. Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Method: Influence of Hole Eccentricity, *Journal of Strain Analysis*, Vol. 14, No. 4, pp. 171-178.
- Schajer, G. S., 1988. Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part I, II, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 110, pp. 338-349.
- Švaříček, K., 2003. Determination of the Calibration Coefficients through the FEM for Measurement of the Uniform Residual Stress by the Hole-Drilling Method, *Experimental Stress Analysis 2003, 41st International Conference*, pp. 101-102.
- Švaříček, K., Vlk, M., 2005. Porovnání procedury ASTM E 837-01 a integrální metody pro výpočet zbytkové napjatosti nehomogenní po hloubce, *sborník 11. konf. Inženýrská mechanika 2005*, pp. 303-304.
- Vangi, D., 1997. Residual Stress Evaluation by the Hole-Drilling Method with Off-Center Hole: An Extension of the Integral Method, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 119, pp. 79-85.
- Wang, J., 1988. Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Method: General Stress-Strain Relationship and its Solution, *Experimental Mechanics*, pp. 355-358.