



INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005

NÁRODNÍ KONFERENCE

s mezinárodní účastí

Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

A COMPARISON OF THE PROCEDURE ASTM E 837-1 AND THE INTEGRAL METHOD FOR NON-UNIFORM RESIDUAL STRESSES MEASURING

K. Švaříček¹, M. Vlk²

Summary: American standard ASTM E 837-01 covers the procedure for determining residual stresses by the hole-drilling strain gauge method. This test method is applicable in those cases where the stresses do not vary significantly with depth. This paper describes the comparison of the non-uniform residual stresses determined by ASTM E 837-01 and by the integral method, which is proposed for the calculating non-uniform residual stresses. The Non-uniform residual stresses are simulated by a linear function for some cases. The calibration coefficients for integral method and for procedure ASTM E 837-01 are stated for the strain gauge rosette RY 61 S of HBM Company. The relaxed strains are simulated by the finite element method (FEM) by the program ANSYS.

1. Úvod

Zbytková napětí jsou napětí, která působí v součásti trvale bez vnějšího zatěžování jako důsledek předchozích technologických pochodů. Při vnějším silovém působení mohou tato zbytková napětí mít škodlivý nebo i užitečný vliv. Abychom mohli např. rozhodnout o tom, jak velké může být vnější zatížení, o volbě dalších technologií nebo kvalitativně posoudit mezní stav, je velmi důležité znát tato zbytková napětí.

Jednou z nejpoužívanějších metod pro měření zbytkového napětí pro svoji jednoduchost, přesnost a malé poškození měřené součásti je metoda vrtání otvoru. Tuto metodu používá i Americká norma ASTM E 837-01. Postup výpočtu v této normě je mimo jiné za předpokladu homogenního zbytkového napětí po hloubce. K výpočtu nehomogenního zbytkového napětí po hloubce je však možné použít například integrální metodu.

Tento článek popisuje numerické určení velikosti odchylek mezi nehomogenním zbytkovým napětím po hloubce určeným dle procedury uvedené v ASTM E 837-01 a dle integrální metody pro tenzometrickou růžici RY 61 S firmy HBM.

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. Teoretický základ metody vrtání otvoru

Tato metoda je založena na měření uvolněné deformace, která vznikne odvrátáním malého otvoru a je úměrná velikosti zbytkového napětí. Tato deformace je obvykle měřena pomocí tenzometrické růžice nalepené v místě měření před zahájením vlastního odvrátání. Aby bylo možno určit dvě hlavní zbytková napětí a jejich směr vzhledem ke zvolenému tenzometru, je k tomu zapotřebí změřit deformace ve třech různých směrech. Vztah mezi změřenou deformací a zbytkovým napětím je při splnění základních předpokladů (homogenní, izotropní, lineárně elastický materiál) lineární. Vzhledem k tomu, že vrtaný otvor je koncentrátorem napětí, předpoklad lineárně elastického materiálu je v praxi splněn přibližně do 1/2 meze kluzu. Pro určení zbytkového napětí z uvolněných deformací je třeba znát kalibrační koeficienty, které vystupují v tomto vztahu. Tyto kalibrační koeficienty jsou funkcí řady parametrů.

Kalibrační koeficienty mohou být určeny několika způsoby. Pro homogenní napjatost po hloubce měřeného materiálu mohou být určeny numericky nebo experimentálně a pro průchozí otvor dokonce i analyticky. Pro nehomogenní napjatost po hloubce mohou být určeny s dostatečnou přesností jen numericky. Průměry otvorů se pohybují v rozmezí od 1 do 4 mm a hloubka otvoru se obvykle realizuje maximálně do 0,4 násobku středního průměru tenzometrické růžice.

Vztah mezi měřenou uvolněnou radiální deformací a napětím je dle (Schajer 1988):

$$\varepsilon_r = -\frac{1+\mu}{2E}a(\sigma_I + \sigma_{II}) - \frac{b}{2E}(\sigma_I - \sigma_{II})\cos 2\alpha \quad (1)$$

kde: ε_r je měřená radiální deformace
 a, b jsou kalibrační koeficienty
 σ_I, σ_{II} jsou hlavní napětí
 α je úhel natočení měřené radiální deformace ε_r od osy σ_I hl. souř. syst.
 μ a E jsou materiálové charakteristiky

Pro jednotlivé tenzometry 45-stupňové tenzometrické růžice dle obr. 1 je možno psát:

$$\varepsilon_A = A(\sigma_I + \sigma_{II}) + B(\sigma_I - \sigma_{II})\cos 2\alpha \quad (2)$$

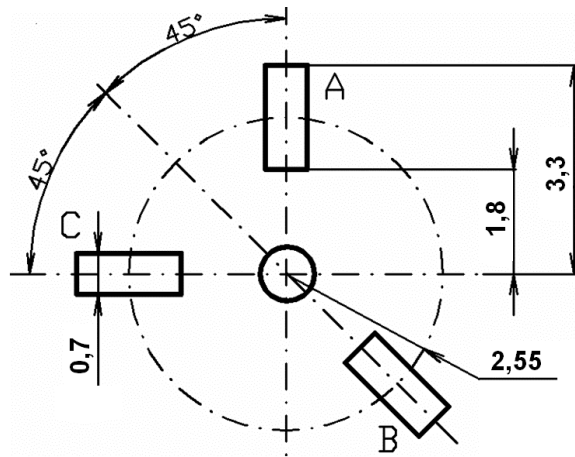
$$\varepsilon_B = A(\sigma_I + \sigma_{II}) + B(\sigma_I - \sigma_{II})\cos(2\alpha + 90) = A(\sigma_I + \sigma_{II}) + B(\sigma_I - \sigma_{II})(-\sin 2\alpha) \quad (3)$$

$$\varepsilon_C = A(\sigma_I + \sigma_{II}) + B(\sigma_I - \sigma_{II})\cos(2\alpha + 180) = A(\sigma_I + \sigma_{II}) + B(\sigma_I - \sigma_{II})(-\cos 2\alpha) \quad (4)$$

kde: $A = -\frac{1+\mu}{2E}a$

$$B = -\frac{1}{2E}b$$

$\varepsilon_A, \varepsilon_B, \varepsilon_C$ jsou změřené deformace jednotlivými tenzometry



Obr. 1: Tenzometrická růžice RY 61 S firmy HBM

Dále dle obr. 2 platí, že:

$$\sigma_I + \sigma_{II} = \sigma_A + \sigma_C \quad (5)$$

$$(\sigma_I - \sigma_{II}) \cos 2\alpha = \sigma_A - \sigma_C \quad (6)$$

$$(\sigma_I - \sigma_{II})(-\sin 2\alpha) = 2\sigma_B - \sigma_A - \sigma_C = -2\tau_{AC} \quad (7)$$

$$(\sigma_I - \sigma_{II})(-\cos 2\alpha) = \sigma_C - \sigma_A \quad (8)$$

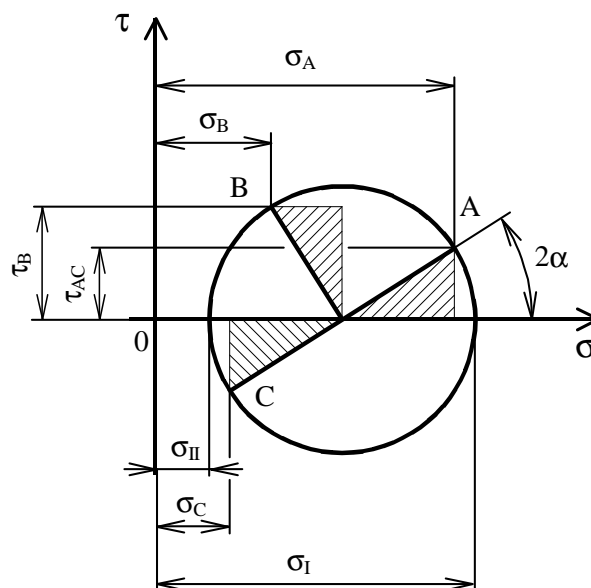
Potom:

$$\varepsilon_A = A(\sigma_A + \sigma_C) + B(\sigma_A - \sigma_C) \quad (9)$$

$$\varepsilon_B = A(\sigma_A + \sigma_C) - 2B\tau_{AC} \quad (10)$$

$$\varepsilon_C = A(\sigma_A + \sigma_C) + B(\sigma_C - \sigma_A) \quad (11)$$

kde: $\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C, \tau_{AC}$ jsou napětí dle obr. 2.



Obr. 2: Mohrova kružnice – napětí ve směrech tenzometrů tenzometrické růžice

Po úpravách může být vztah mezi třemi uvolněnými změřenými deformacemi a hledanými napětími psán v kompaktním maticovém tvaru:

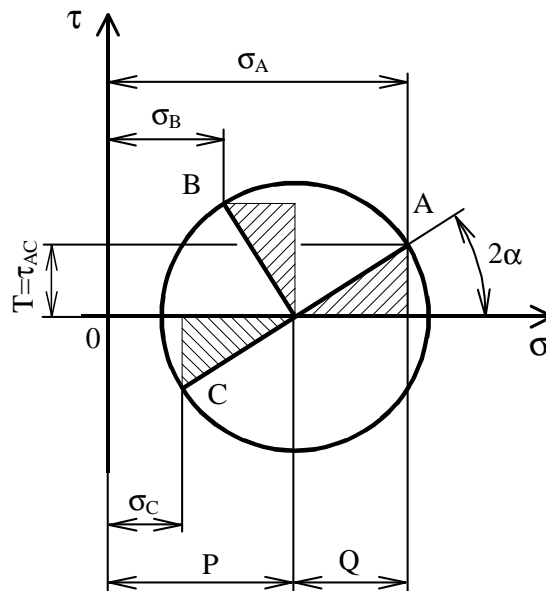
$$\begin{bmatrix} A-B & 0 & A+B \\ A & -2B & A \\ A+B & 0 & A-B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_A \\ \tau_{AC} \\ \sigma_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_A \\ \varepsilon_B \\ \varepsilon_C \end{bmatrix} \quad (12)$$

Maticová rovnice (12) může být rozložena na tři nezávislé rovnice užitím následující substituce:

$$P = \frac{\sigma_A + \sigma_C}{2}, \quad Q = \frac{\sigma_A - \sigma_C}{2}, \quad T = \tau_{AC} \quad (13)$$

$$p = \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{2}, \quad q = \frac{\varepsilon_A - \varepsilon_C}{2}, \quad t = \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C - 2\varepsilon_B}{2} \quad (14)$$

kde jednotlivé veličiny P , Q a T lze reprezentovat v Mohrově kružnici podle obr. 3.



Obr. 3: Mohrova kružnice – transformovaná napětí P , Q , T

Vzniklé tři rovnice mohou být řešeny samostatně a mají tvar:

$$aP = -\frac{E}{1+\mu} p \quad (15)$$

$$bQ = -Eq \quad (16)$$

$$bT = -Et \quad (17)$$

Z vypočtených P , Q a T může být zpětně určeno napětí pod jednotlivými tenzometry takto:

$$\sigma_C = P - Q, \quad \sigma_A = P + Q, \quad \tau_{AC} = T \quad (18)$$

nebo přímo velikosti hlavních napětí v materiálu měřeného vzorku a jejich natočení takto:

$$\sigma_I, \sigma_{II} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg}\left(\frac{-T}{-Q}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{arctg}\left(\frac{t}{q}\right) \quad (20)$$

kde úhel α je úhel měřený ve směru chodu hodinových ručiček od tenzometru A k hlavnímu napětí σ_I . Jelikož však je funkce arctg nejednoznačná musíme o velikosti úhlu rozhodnout i podle znamének čitatele a jmenovatele v rovnici (20) dle tabulky 1.

Tab. 1: Určení úhlu natočení hlavních napětí

t	+	+	-	-
q	+	-	-	+
α [1°]	0 ÷ 45	45 ÷ 90	90 ÷ 135	135 ÷ 180

K minimalizaci náhodných vlivů při měření deformací při postupném odvrtávání je vhodné použít dle (Schajer 1992) místo vztahů (15), (16), (17) vztahy pro P , Q a T tyto:

$$P = -\frac{E}{1 + \mu} \frac{\sum_j a(h_j) p(h_j)}{\sum_j a(h_j)^2} \quad (21)$$

$$Q = -E \frac{\sum_j b(h_j) q(h_j)}{\sum_j b(h_j)^2} \quad (22)$$

$$T = -E \frac{\sum_j b(h_j) t(h_j)}{\sum_j b(h_j)^2} \quad (23)$$

kde h_j je j -tá hloubka otvoru při postupném odvrtávání.

Vztah (20) potom použijeme ve tvaru:

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg}\left(\frac{-T}{-Q}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{arctg}\left(\frac{\sum_j b(h_j) t(h_j)}{\sum_j b(h_j) q(h_j)}\right) \quad (24)$$

Tento přístup minimalizace náhodných vlivů měření vychází z předpokladu homogenního napětí po hloubce materiálu.

Vlastní postup při měření:

1. Příprava vzorku, jeho povrchu, nalepení tenzometrické růžice a její připojení k indikátoru.
2. Vrtání otvoru uprostřed tenzometrické růžice. Excentricita vrtaného otvoru a středu tenzometrické růžice dle ASTM E 837-01 by měla být menší než větší z hodnot: 0,004ti násobku středního průměru tenzometrické růžice (D) nebo 0.025 mm. Odvrtáváním se nesmí způsobit plastická deformace okolí otvoru. Dle ASTM E 837-01 je vzorek o tloušťce přinejmenším rovné $1,2D$ považován za „tlustý“ a je pro něj možné použít postupné odvrtávání až na osm přírůstků hloubky otvoru s krokem $0,05D$ až do hloubky otvoru $0,4D$. Vzorek o tloušťce menší než $0,4D$ je považován za „tenký“ a vrtání probíhá na jeden krok, který vytvoří průchozí otvor.
3. Odečtení uvolněných deformací po ustálení teploty vzorku na teplotu před odvrtáváním.
4. Výpočet velikosti hlavních zbytkových napětí a úhlu jejich natočení užitím vztahů (14), (15), (16), (17), (19) a (20) pro „tenký“ vzorek, tj. pro průchozí otvor resp. (14), (21), (22), (23), (19) a (24) pro „tlustý“ vzorek, tj. pro postupné odvrtávání.

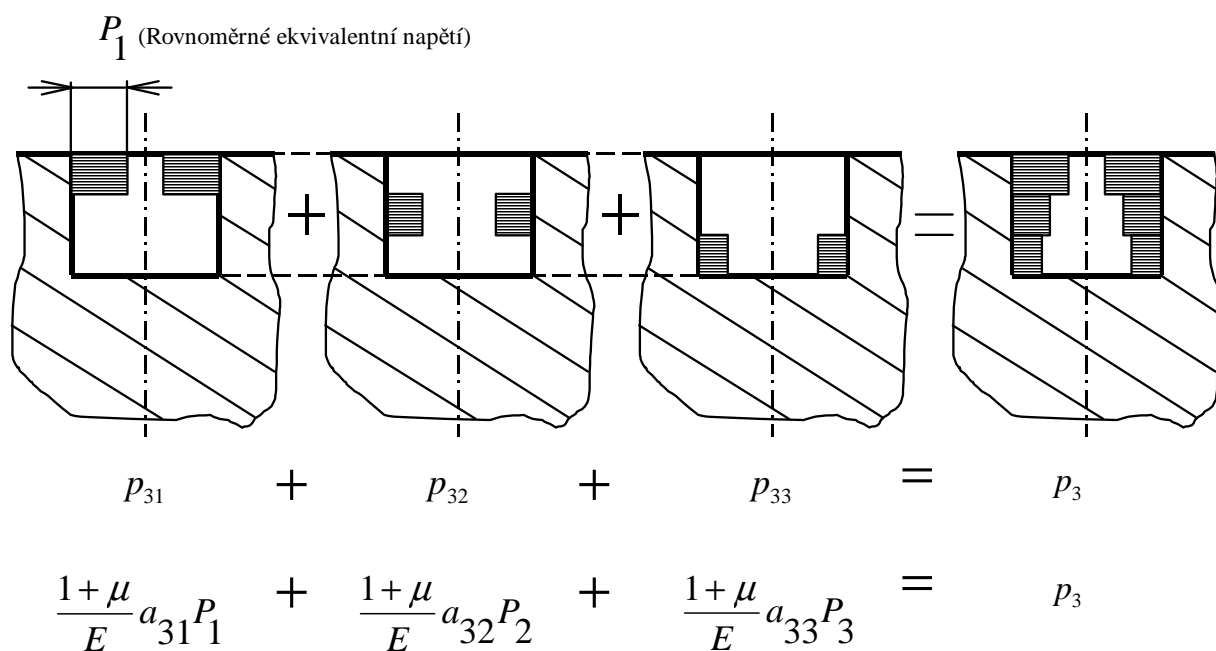
Výše uvedený postup a vztahy platí za předpokladu, že zbytkové napětí je v odvrtávaném objemu homogenní a to jak po hloubce tak i v rovinách rovnoběžných s povrchem. Pokud je zbytkové napětí podstatně nehomogenní po hloubce materiálu (dle ASTM E 837-01 naměřené procentuální hodnoty deformací p , q , t v závislosti na hloubce otvoru, kde 100% odpovídá deformaci při hloubce $0,4D$, jsou rozdílné více jak o 3% od křivek pro homogenní napjatost), je nutno použít některou z metod pro určování nehomogenního zbytkového napětí po hloubce - např. integrální metodu. Jinak určené zbytkové napětí podle vztahů (14), (15), (16), (17), (19) a (20) je rovno ekvivalentnímu konstantnímu zbytkovému napětí po hloubce a ne skutečnému.

Tento postup, který používá norma ASTM E 837-01 byl použit pro výpočet nehomogenního napětí po hloubce. Vypočtená zbytková napětí byla porovnána s napětími určenými integrální metodou.

3. Integrální metoda

Integrální metoda předpokládá, že uvolněná deformace p_i při určité hloubce otvoru, je dle zákona superpozice součtem všech dílčích deformací p_{ij} od všech dílčích napětí P_j působících na diskrétních přírůstcích hloubky otvoru dle obr. 4.

Jednotlivé dílčí přírůstky deformace p_{ij} vyjádříme pomocí napětí P_j působících v jednotlivých přírůstcích hloubky otvoru pomocí výše uvedených vztahů (15), (16), (17).



Obr. 4: Grafické znázornění výpočtu nehomogenního napětí po hloubce integrální metodou

Pro určitou hloubku otvoru potom dostáváme:

$$\sum_{j=1}^{j=i} a_{ij} P_j = \frac{E}{1+\mu} p_i \quad 1 \leq j \leq i \leq n \quad (25)$$

kde index $i = i$ -tý přírůstek hloubky otvoru
 $j = j$ -tá poloha působení zbytkového napětí
 $n =$ celkový počet přírůstků hloubky otvoru

Analogické vztahy dostaneme pro Q, q resp. T, t :

$$\sum_{j=1}^{j=i} b_{ij} Q_j = E p_i \quad 1 \leq j \leq i \leq n \quad (26)$$

$$\sum_{j=1}^{j=i} b_{ij} T_j = E t_i \quad 1 \leq j \leq i \leq n \quad (27)$$

Kde P_j, Q_j, T_j, p_i, q_i a t_i jsou dány vztahy (13) a (14).

Po rozepsání těchto vztahů (25), (26) a (27) pro všechny dílčí diskrétní přírůstky hloubky otvoru dostaneme i rovnic, které můžeme zapsat v maticovém tvaru:

$$\mathbf{aP} = \frac{E}{1+\mu} \mathbf{p} \quad (28)$$

$$\mathbf{bQ} = E \mathbf{q} \quad (29)$$

$$\mathbf{bT} = E \mathbf{t} \quad (30)$$

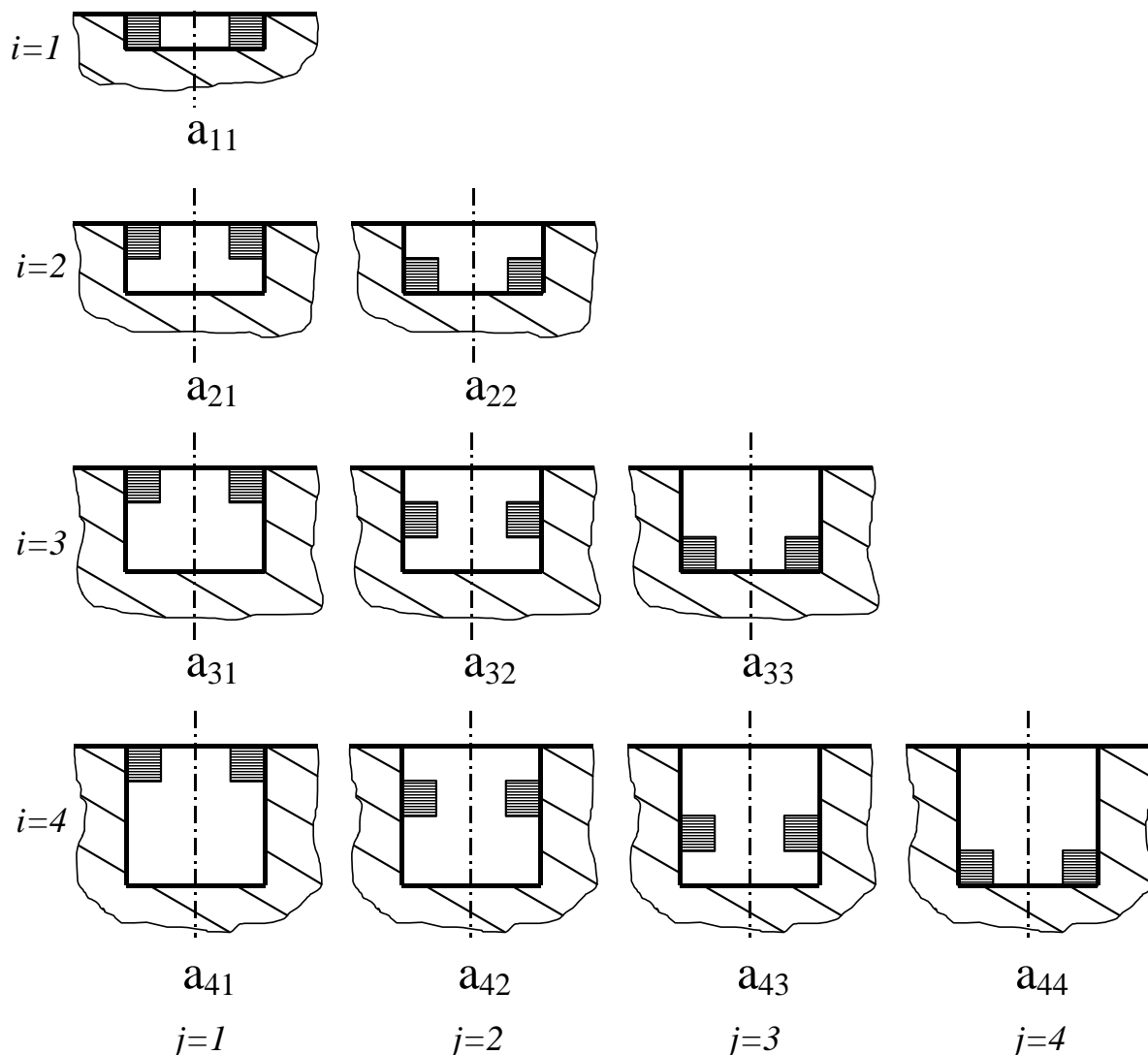
Například pro čtyři přírůstky hloubky otvoru jsou jednotlivé matice resp. vektory následujícího tvaru:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} \quad \mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Analogicky pro \mathbf{Q} , \mathbf{q} resp. \mathbf{T} , \mathbf{t} .

Při známém \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{p} , \mathbf{q} a \mathbf{t} je již možné z těchto vztahů určit zbytková napětí \mathbf{P} , \mathbf{Q} , \mathbf{T} a následným užitím vztahů (19) a (20) pro každý přírůstek hloubky otvoru hlavní zbytková napětí a úhel jejich natočení.

Jednotlivé koeficienty a_{ij} , resp. b_{ij} představují uvolněnou deformaci jednotkovým zbytkovým napětím působícím na j -tém inkrementu při i -tém přírůstku hloubky otvoru dle obr. 5.



Obr. 5: Grafické znázornění kalibračních koeficientů a_{ij} pro integrální metodu

Dle (25) až (27) a obr. 4 je zřejmé, že pro homogenní napjatost po tloušťce musí být součet koeficientů na jednotlivých řádcích matice **a** resp. **b** roven koeficientům pro homogenní napjatost pro příslušné hloubky otvoru.

Teoreticky by vztahy (25) až (27) měly být vyjádřeny integrálně takto:

$$\int_0^h \widehat{A}(H, h) P(H) dH = \frac{E}{1 + \mu} p(h) \quad 0 \leq H \leq h \quad (32)$$

a analogicky pro $q(h)$ a $t(h)$.

Nicméně uvolněná deformace se v praxi odměřuje až po odvrtání určité hloubky otvoru a proto je nutno použít již dříve uvedené vztahy (25) až (27).

Přepočtení mezi a_{ij} a $\widehat{A}(H, h)$ je dán vztahem:

$$a_{ij} = \int_{H_{j-1}}^{H_j} \widehat{A}(H, h_i) dH \quad (33)$$

Předpoklady integrální metody jsou například oproti metodě přírůstků deformace, metodě ekvivalentních rovnoměrných napětí nebo metodě průměrných napětí v souladu se skutečností. Integrální metoda na základě diskretních koeficientů a_{ij} resp. b_{ij} určuje ekvivalentní rovnoměrná napětí na jednotlivých přírůstcích hloubek otvoru.

Jednotlivé kalibrační koeficienty není možné stanovit analyticky a téměř nemožné stanovit experimentálně z důvodu obtížného a přesného zatěžování. Vhodným způsobem je použití metody konečných prvků (MKP).

4. MKP model, výpočet kalibračních koeficientů a uvolněných deformací

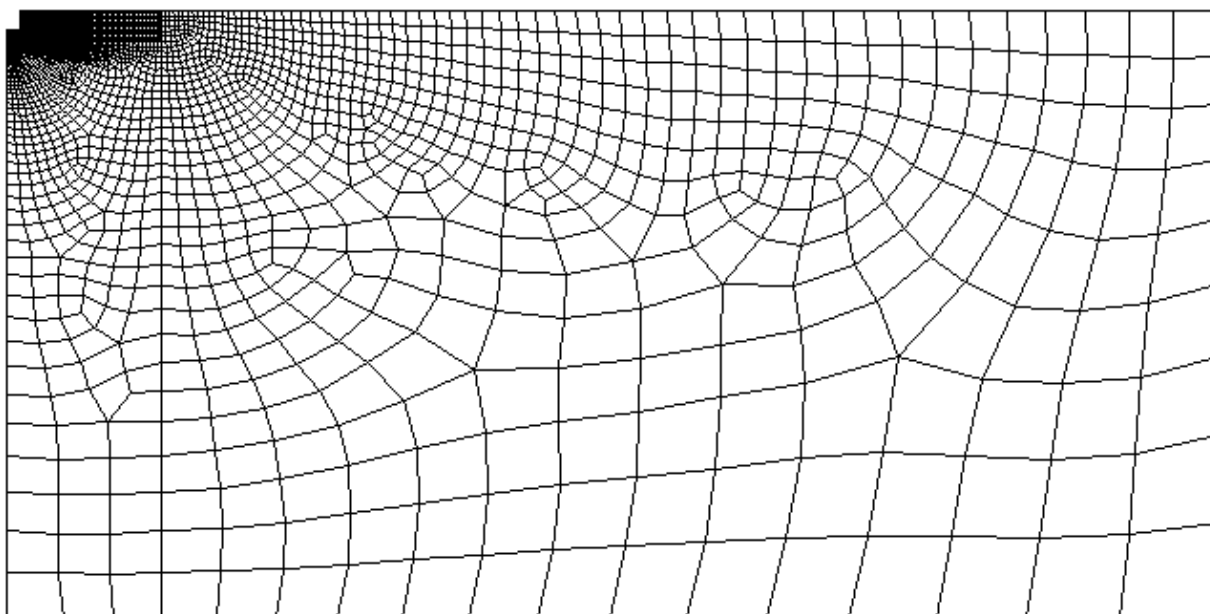
Pro určení kalibračních koeficientů pro integrální metodu i pro proceduru použitou v ASTM (pro metodu ekvivalentních napětí) a dále pro určení uvolněných deformací při simulovaném nehomogenním zbytkovém napětí po hloubce byl vytvořen vhodný MKP model (obr. 6 a 7). Byl zvolen dvojrozměrný geometricky osově symetrický model s osově nesymetrickým zatížením. Zatížení je dáno dle řady harmonických funkcí – Fourierovy řady – například takto:

$$F(\theta) = A_0 + A_1 \cos \theta + B_1 \sin \theta + A_2 \cos 2\theta + B_2 \sin 2\theta + A_3 \cos 3\theta + B_3 \sin 3\theta + \dots$$

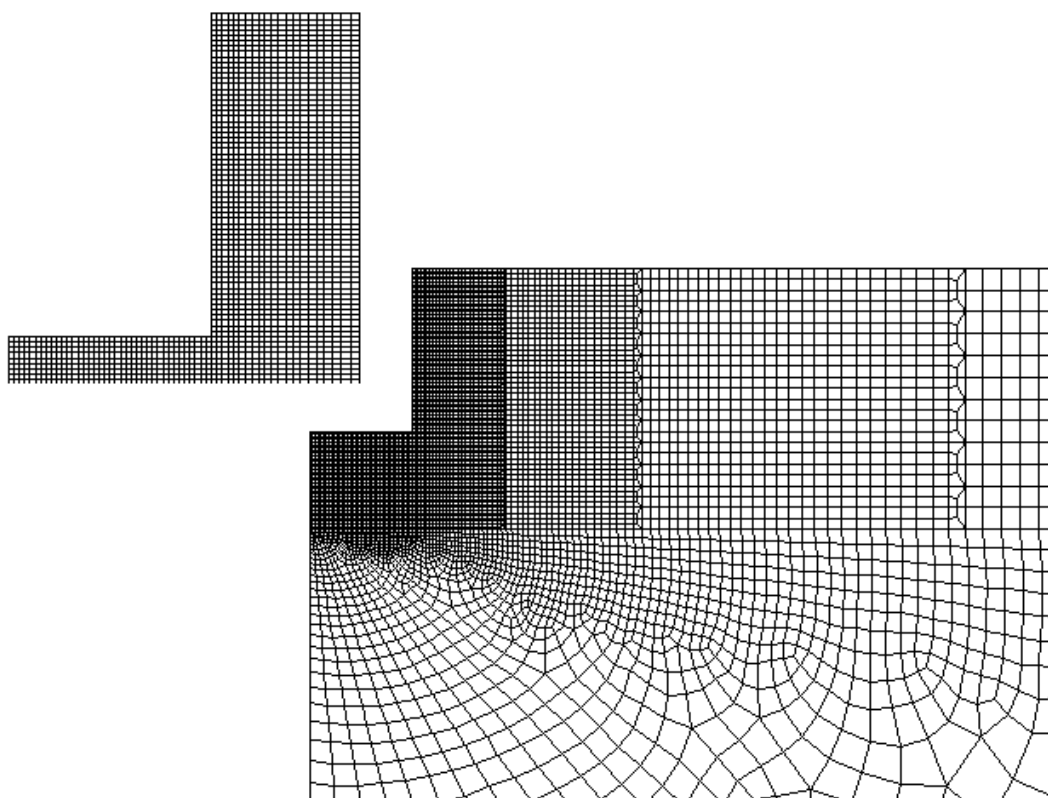
Přičemž platí, že zatížení pro určení koeficientu a je ve tvaru: $F(\theta) = A_0$ a pro určení koeficientu b ve tvaru: $F(\theta) = A_2 \cos 2\theta$ pro radiální sílu a $F(\theta) = B_2 \sin 2\theta$ pro obvodovou sílu.

Vhodnost tohoto modelu byla ověřena provedením citlivostní analýzy na určení velikosti tělesa, počtu elementů a na určení střední hodnoty deformace ve směru osy tenzometrické mřížky přes jeho plochu. Dále pomocí tohoto modelu byly určeny kalibrační koeficienty pro tenzometrickou různici typu A uvedenou v ASTM. Takto určené koeficienty se s nepodstatnými odchylkami shodovaly s koeficienty uvedenými v ASTM. Nadto byl vytvořen

i trojrozměrný model, který při simulaci zbytkového napětí dával výsledky uvolněných deformací opět v souladu s ostatními.



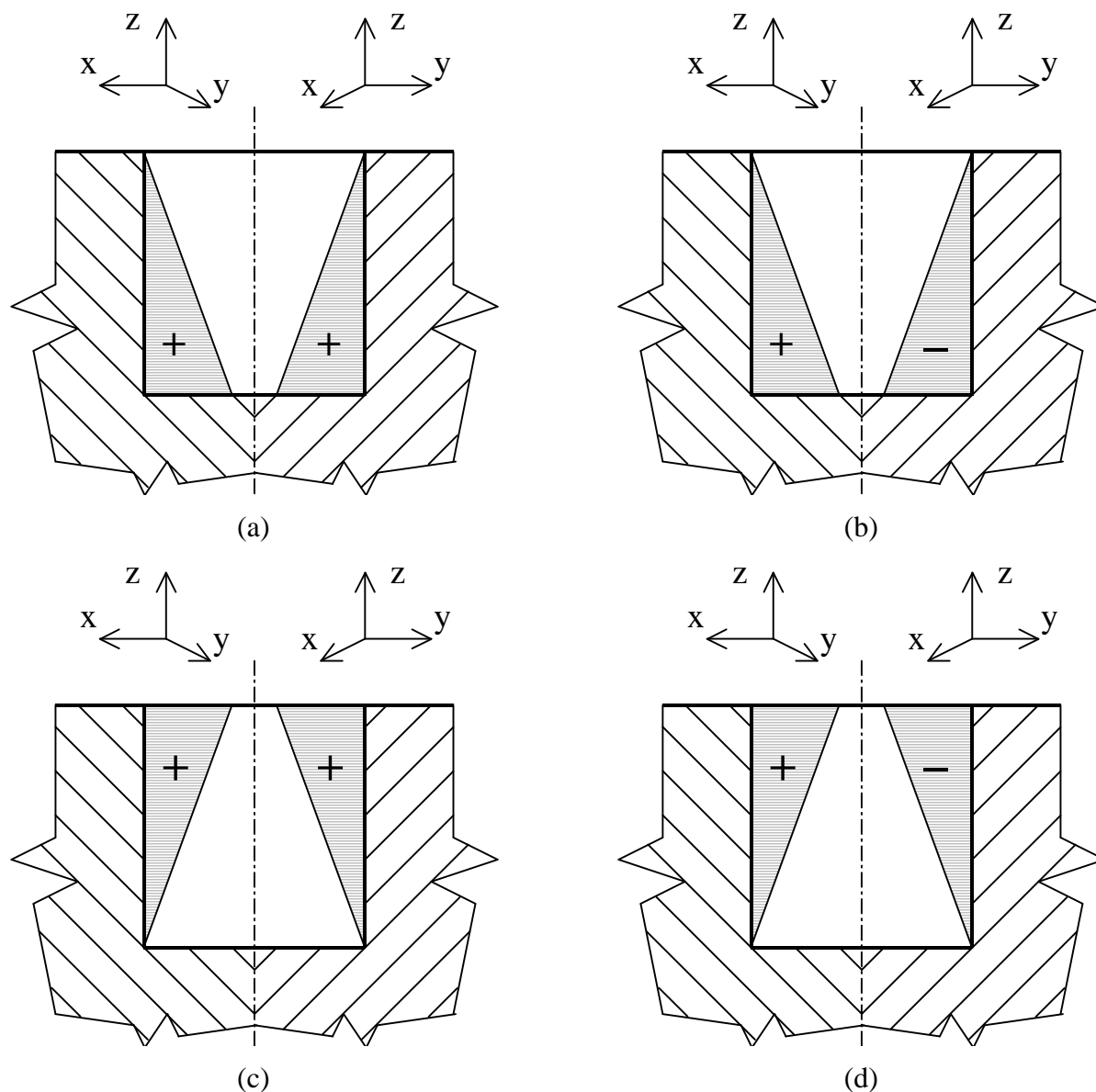
Obr. 6: MKP síť modelovaného tělesa



Obr. 7: Detail MKP sítě v okolí otvoru

Tyto výpočty kalibračních koeficientů byly provedeny pro průměr vrtaného otvoru 1,6 mm, pro maximální hloubku otvoru 1,275 mm (tj. 0,5ti násobek středního poloměru tenzometrické růžice) s deseti přírůstků hloubky otvoru, pro tenzometrickou růžici RY 61 S firmy HBM.

Simulovaná nehomogenní zbytková napjatost byla zvolena pro několik případů lineární závislosti po hloubce otvoru tak jak je uvedeno na obr. 8. Gradient tohoto lineárního nehomogenního napětí je 78 MPa/mm. Příklad (a) a (c) odpovídá rozložením zatížení v rovinách rovnoběžných s povrchem zatížení pro koeficient a . Příklad (b) a (d) odpovídá zatížení pro koeficient b . Příklad (a) je rostoucí zatížení od 0 MPa do 100 MPa pro maximální hloubku otvoru, které způsobí stejné tahové napětí v obou osách. Příklad (b) je rostoucí zatížení od 0 MPa do 100 MPa pro maximální hloubku otvoru, které způsobí tahové napětí v ose x a tlakové v ose y . Příklad (c) je klesající zatížení od 100 MPa do 0 MPa pro maximální hloubku otvoru, které způsobí stejné tahové napětí v obou osách. Příklad (d) je klesající zatížení od 100 MPa do 0 MPa pro maximální hloubku otvoru, které způsobí tahové napětí v ose x a tlakové v ose y .

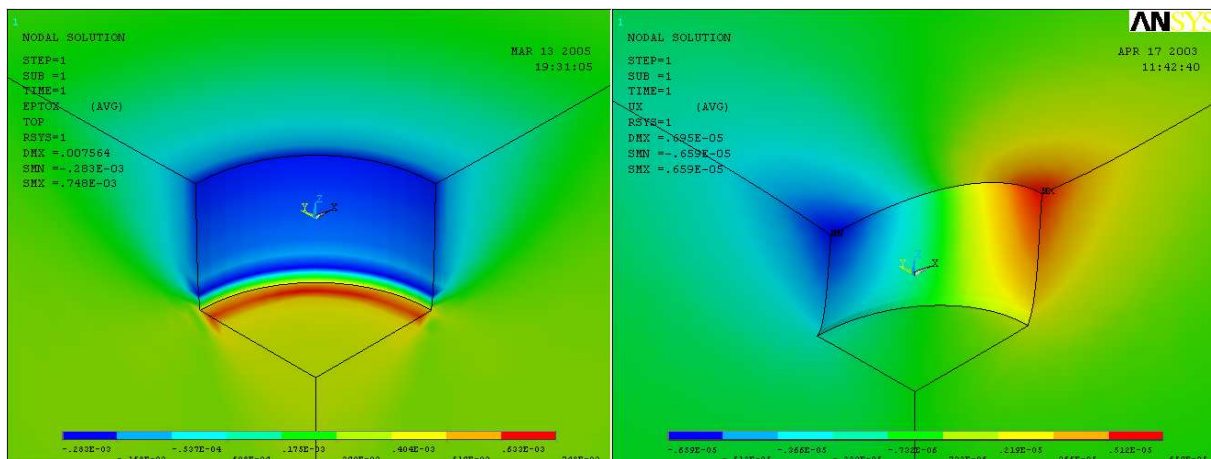


Obr. 8: Průběh simulovaného zbytkového napětí po hloubce tělesa

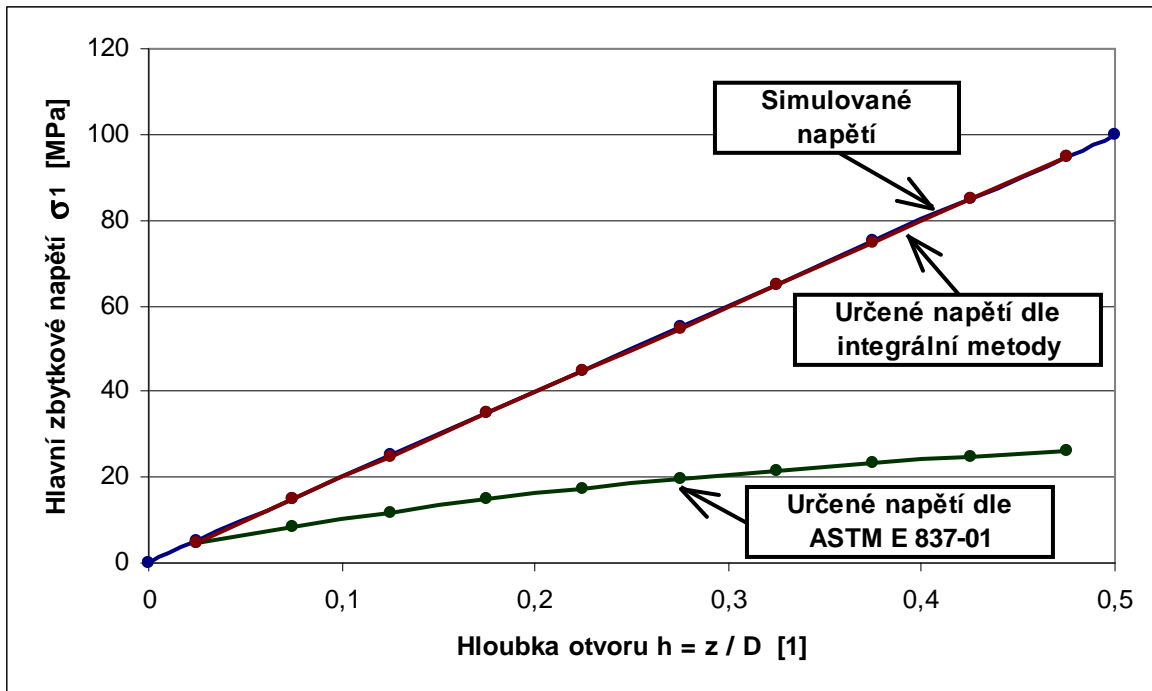
Pomocí principu superpozice těchto čtyř základních lineárních průběhů zbytkového napětí po hloubce můžeme sestavit libovolný lineární průběh. Například součtem resp. rozdílem případů (a) až (d) takto: $[(a) - (b) + (c) + (d)]/2$ získáme klesající tahové zbytkové napětí v ose x od 100 MPa do 0 MPa pro maximální hloubku otvoru a rostoucí tahové zbytkové napětí v ose y od 0 MPa do 100 MPa pro maximální hloubku otvoru. Tento případ je také uvažován v kapitole 5. obr. 11.

5. Výsledky

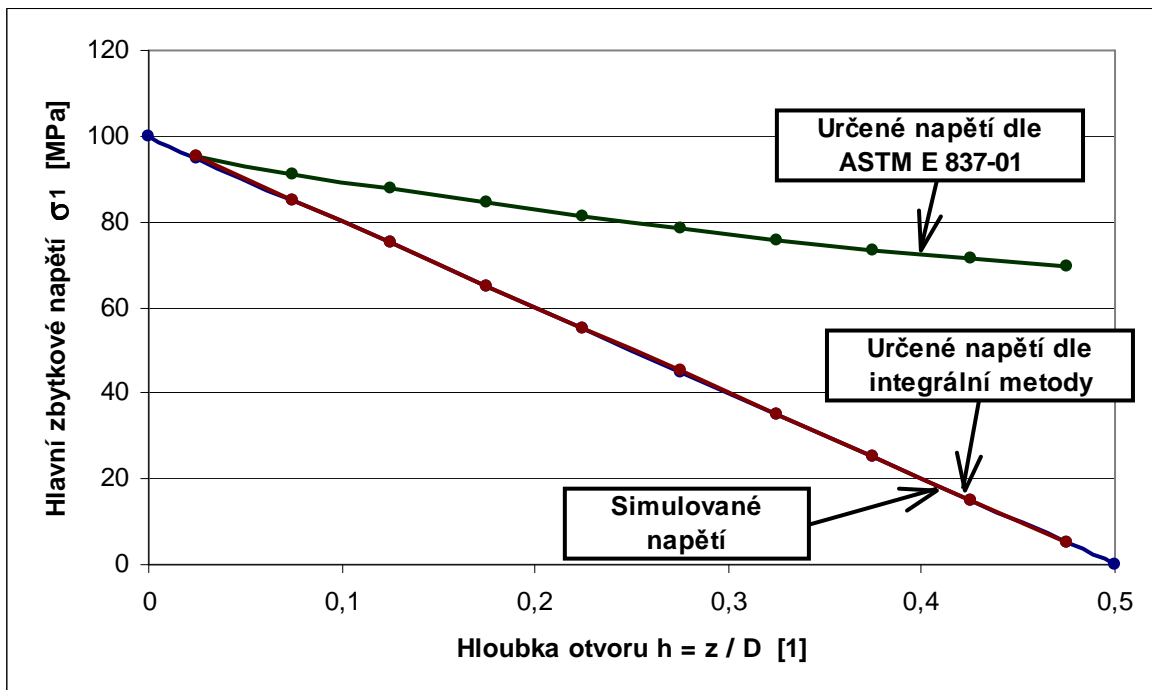
Vypočtené zbytkové napětí nehomogenní po hloubce pomocí integrální metody a podle ASTM E 837-01 na základě koeficientů a deformací určených MKP je pro případ (a) a (d) z obr. 8 znázorněno na obr. 10 a 11. Tyto grafy uvádí průběh napětí jen v ose x, tj. průběh maximálního hlavního zbytkového napětí σ_1 . Průběh napětí v ose y je pro případ (a) stejný jako na obr. 10, pro případ (d) je stejný jako na obr. 11 jen s opačným znaménkem.



Obr. 9: Napjatostní a deformační stav tělesa v okolí vrtaného otvoru pro zatížení k určení kalibračního koeficientu a resp. b

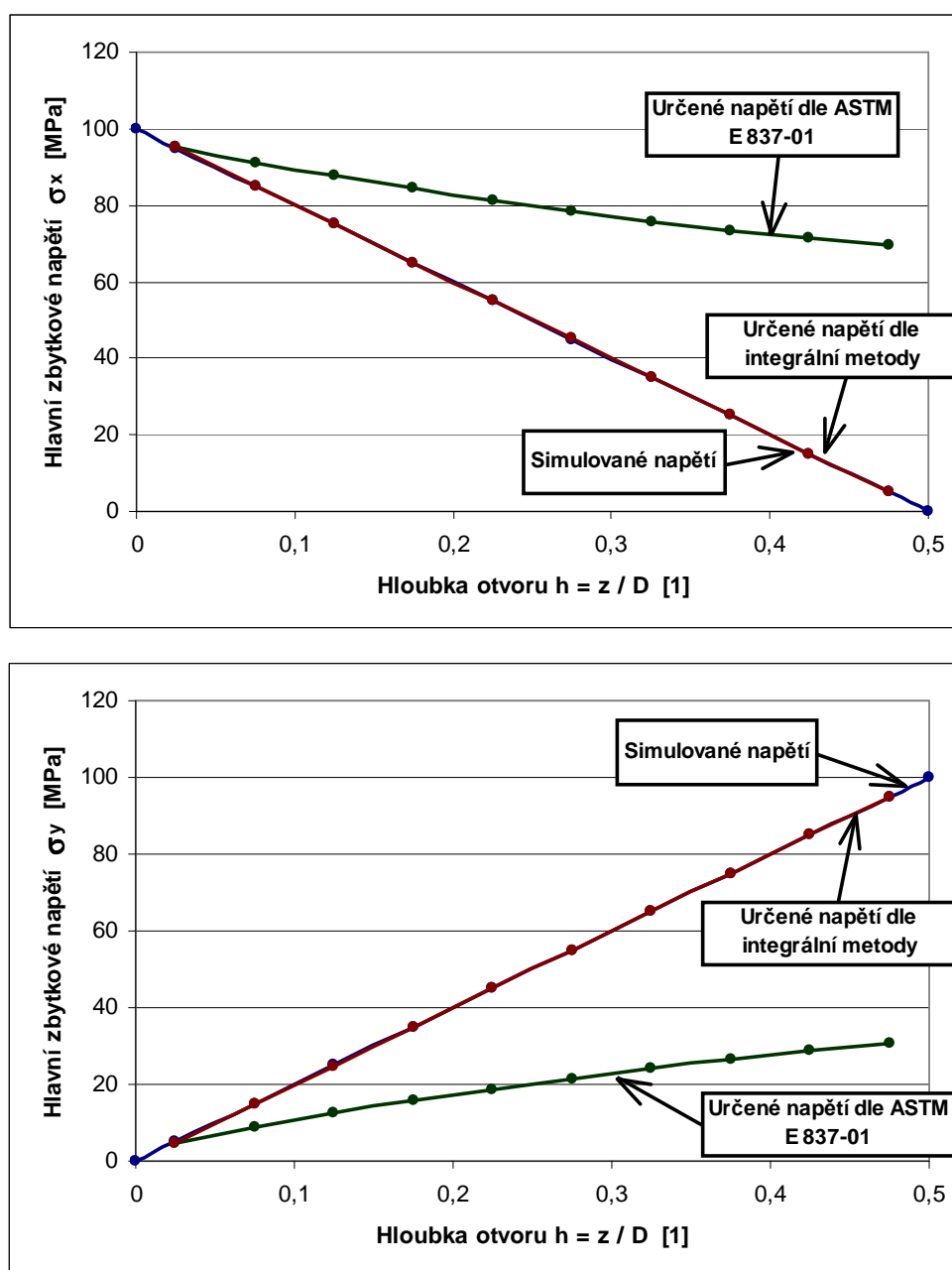


Obr. 10: Průběh simulovaného zbytkového napětí po hloubce tělesa a napětí určeného dle ASTM E 837-01 a integrální metody pro případ (a) z kapitoly 4



Obr. 10: Průběh simulovaného zbytkového napětí po hloubce tělesa a napětí určeného dle ASTM E 837-01 a integrální metody pro případ (d) z kapitoly 4

Dále byl při vyhodnocení zvažován případ klesajícího tahového zbytkového napětí po hloubce v jednom směru a rostoucího zbytkového napětí po hloubce ve druhém směru, tj. součet resp. rozdíl případů [(a) – (b) + (c) + (d)]/2 tak jak bylo uvedeno v kapitole 4. Výsledné napětí pro tento případ nebylo určeno jako součet resp. rozdíl všech napětí získaných z jednotlivých případů (a) až (d). Postup byl takový, že nejprve byl proveden součet resp. rozdíl jednotlivých deformací určených pro tyto dílčí případy pro každý tenzometr tenzometrické růžice zvlášť. Až poté na základě takto získaných deformací bylo vyhodnoceno zbytkové napětí pomocí ASTM E 837-01 a integrální metody. Takovéto simulované napětí společně s napětím určeným ASTM E 837-01 a integrální metodou pro oba směry je znázorněno na obr. 11.



Obr. 11: Průběh simulovaného zbytkového napětí po hloubce tělesa a napětí určeného dle ASTM E 837-01 a dle integrální metody pro případ [(a) – (b) + (c) + (d)]/2 z kapitoly 4

6. Závěr

Tento článek popisuje numerické určení velikosti odchylek mezi nehomogenním zbytkovým napětím po hloubce určeným dle procedury uvedené v ASTM E 837-01 a dle integrální metody pro tenzometrickou růžici RY 61 S firmy HBM a průměr vrtaného otvoru 1,6 mm. Nehomogenní zbytkové napětí je simulováno lineárně s měnící se hloubkou otvoru s gradientem 78 MPa/mm jak je uvedeno na obr. 8.

Výsledky zbytkové napjatosti určené integrální metodou se shodují se simulovaným napětím. Maximální odchylka ze třech vyhodnocovaných případů v kapitole 5 je jen 0,2 MPa.

Zbytková napětí určená dle ASTM E 837-01 jsou pro dané nehomogenní simulované zbytkové napětí výrazně odlišná. Maximální odchylka ve všech případech se pohybuje kolem 65 MPa a to při maximální hloubce otvoru. Z uvedených grafů v kapitole 5 je vidět, že hodnota v prvním přírůstku hloubky otvoru se shoduje se simulovaným napětím. V následujících přírůstcích hloubky otvoru se sice zbytkové napětí určené tímto způsobem snaží přiblížit simulovanému nehomogennímu napětí, ovšem větší tendenci má zůstat konstantní podle první hodnoty. Velikost odchylky zbytkového napětí určovaného dle ASTM E 837-01 od skutečného závisí na velikosti gradientu zbytkového napětí s hloubkou. Tato norma však uvádí, že její použitelnost je pouze pokud procentuální průběh změřených uvolněných deformací p , q , t v závislosti na hloubce otvoru se neliší více jak o 3% od průběhu těchto hodnot pro homogenní napjatost.

Lze tedy vidět, že Americká norma ASTM E 837-01 skutečně není schopna postihnout nehomogenní napětí po hloubce tělesa. Pokud je zbytková napjatost podstatně nehomogenní po hloubce tělesa, je výsledné zbytkové napětí dle této normy výrazně odlišné od napětí skutečného. Nelze tedy potom použít pro vyhodnocování postup popsany v této normě a je nutno použít například právě uvedenou integrální metodu.

7. Literatura

ASTM Designation E 837-01, *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2001, pp. 1-10

Schajer, G.S.: *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, 1988

Schajer, G.S.: *Strain Data Averaging for the Hole-Drilling Method*, Strain, Vol. 28, No. 2, pp. 19-22, 1992

Švaříček, K.: *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, 2003