Experimentální Analýza Napětí 2003

DETERMINATION OF THE CALIBRATION COEFFICIENTS THROUGH THE FEM FOR MEASUREMENT OF THE UNIFORM RESIDUAL STRESS BY THE HOLE-DRILLING METHOD

STANOVENÍ KALIBRAČNÍCH KOEFICIENTŮ POMOCÍ MKP PRO MĚŘENÍ ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI HOMOGENNÍ PO HLOUBCE ODVRTÁVACÍ METODOU

Karel Švaříček [1]

One of the most used methods for measurement residual stresses is the hole-drilling method. This method is based on drilling a small and shallow hole. If the residual stresses are present then the strain releases, which is usually measured by means of strain gauge rosette. The residual stresses from the strains obtained this way, we can determine by the help of derived equations. In these equations exsert calibration coefficients, which represents a relation between relaxed strain and residual stresses. These coefficients, which are functions to many parameters, is necessery to determine in advance. It is possible to determine them by several ways – analytically, numerically (for example through the finite element method - FEM) and experimentally. This article deals with determination of this coefficient numerically by the FEM for measurement of residual stresses which are uniform by the depth for the strain gauge rosette RY 61 S.

Keywords

hole-drilling method, residual stress, calibration coefficients, relaxed strain, strain gauge rosette, finite element method.

Klíčová slova

Odvrtávací metoda, zbytková napjatost, kalibrační koeficienty, uvolněná deformace, tenzometrická růžice, metoda konečných prvků.

1. Úvod

Zbytková napětí jsou napětí, která působí v součásti trvale bez vnějšího zatěžování jako důsledek předchozích technologických pochodů. Těmito technologiemi, které způsobují zbytkové napětí mohou být: odlévání, kování, svařování, tepelné zpracování, tažení, válcování, válečkování a další. Zbytková napětí ovlivňují napjatost tělesa. Při vnějším silovém působení mohou tato zbytková napětí mít škodlivý nebo i užitečný vliv.

[1] Ing. Karel Švaříček: Ústav mechaniky těles, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně; Technická 2, 616 69 Brno, tel.: +420-5-41142893, e-mail: svaricek@umtn.fme.vutbr.cz

Škodlivý účinek je v těch místech, kde zbytková napětí mají stejné znaménko jako napětí od vnějšího zatížení (vyskytuje se obvykle u odlitků a svarků). Užitečný vliv zbytkového napětí je tam, kde jeho znaménko je opačné než znaménko napětí od vnějšího zatížení (tohoto se využívá v praxi za pomoci např. válečkování, kalení, tažení). Abychom tedy 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.

Podle míry rozlišitelnosti rozeznáváme zbytková napětí makroskopická, mikroskopická a submikroskopická. Makroskopická napětí jsou zprůměrováním celkového průběhu zbytkového napětí přes několik zrn materiálu. Tato napětí nás zajímají nejvíce a tudíž se zabýváme i jejich měřením. Mikroskopická napětí jsou střední hodnotou napětí v rozmezí jednoho zrna. Submikroskopická napětí jsou napětí pozorovaná v oblasti několika atomových vzdáleností.

Pro měření zbytkové napjatosti existuje celá řada metod. Jednou z nejpoužívanějších pro svoji jednoduchost, přesnost a malé poškození měřené součásti je odvrtávací metoda, která je považována za semidestruktivní. Tato metoda umožňuje analyzovat makroskopickou rovinnou zbytkovou napjatost, která je homogenní v rovinách rovnoběžných s povrchem. Tento článek se bude zabývat měřením po hloubce homogenního zbytkového napětí odvrtávací metodou pomocí tenzometrické růžice firmy HBM typu 1,5/120 RY 61 S.

2. Teoretický základ odvrtávací metody

Tato metoda je založena na měření uvolněné deformace, která vznikne odvrtáním malého mělkého otvoru a je úměrná velikosti zbytkového napětí. Tato deformace je obvykle měřena pomocí tenzometrické růžice nalepené v místě měření před zahájením vlastního odvrtávání. Aby bylo možno určit dvě hlavní zbytková napětí a jejich směr vzhledem ke zvolenému tenzometru, je k tomu zapotřebí změřit tři nezávislé deformace (vektory ve směru deformací jsou nezávislé). Vztah mezi změřenou deformací a zbytkovým napětím je při splnění základních předpokladů (homogenní, izotropní, lineárně elastický materiál) lineární. 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. Průměry otvorů se pohybují v rozmezí od 1 do 4 mm a hloubka otvoru se obvykle realizuje do ½ středního poloměru tenzometrické růžice.

Vztah mezi měřenou uvolněnou radiální deformací a napětím je dle [1]:

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

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_1 hl. souř. syst.

μ a E jsou materiálové charakteristiky

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

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

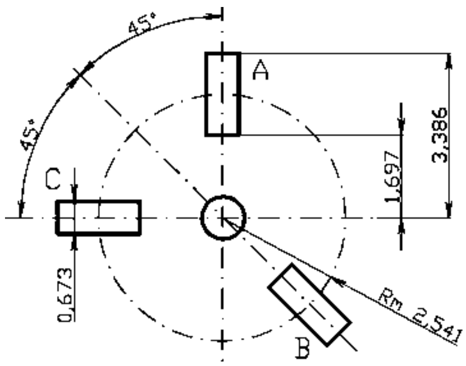
$$\varepsilon_B = A(\sigma_I + \sigma_{II}) + B(\sigma_I - \sigma_{II})\cos(2\alpha + 90) = A(\sigma_I + \sigma_{II}) + B(\sigma_I - \sigma_{II})(-\sin 2\alpha) \tag{3}$$

$$\varepsilon_C = A(\sigma_1 + \sigma_2) + B(\sigma_I - \sigma_{II})\cos(2\alpha + 180) = A(\sigma_I + \sigma_{II}) + B(\sigma_I - \sigma_{II})(-\cos 2\alpha) \tag{4}$$

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:

$$\sigma_I + \sigma_{II} = \sigma_A + \sigma_C \tag{5}$$

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

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

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

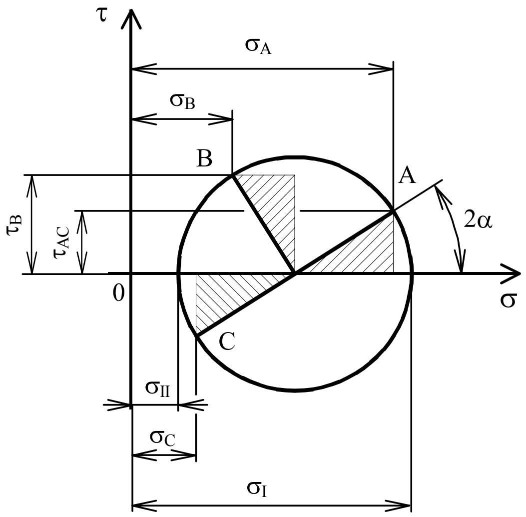
Potom:

$$\varepsilon_A = A(\sigma_A + \sigma_C) + B(\sigma_A - \sigma_C) \tag{9}$$

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

$$\varepsilon_C = A(\sigma_A + \sigma_C) + B(\sigma_C - \sigma_A) \tag{11}$$

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



Obr. 2: Mohrova kružnice pro tenzometr RY 61 S

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

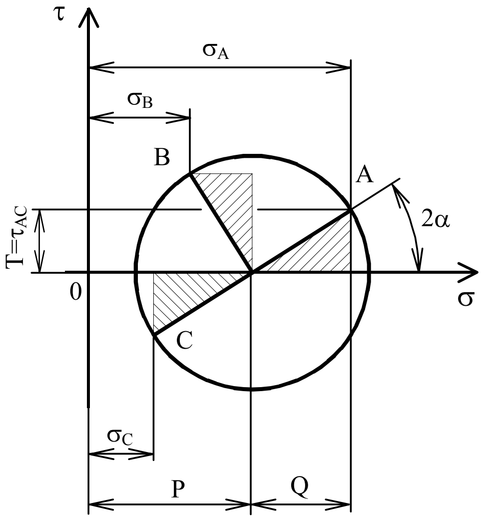
$$\begin{bmatrix} A-B & 0 & A+B \\ A & -2B & A \\ A+B & 0 & A-B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_A \\ \tau_{AC} \\ \sigma_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_A \\ \varepsilon_B \\ \varepsilon_C \end{bmatrix} \tag{12}$$

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

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

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

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



Obr. 3: Mohrova kružnice

Vzniklé tři rovnice mohou být řešeny samostatně a mají tvar:

$$aP = \frac{E}{1+\mu} p \tag{15}$$

$$bQ = Eq \tag{16}$$

$$bT = Et \tag{17}$$

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

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

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

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

$$\alpha = \frac{1}{2}\mathrm{arctg}(\frac{T}{Q}) = \frac{1}{2}\mathrm{arctg}(\frac{t}{q}) \tag{20}$$

kde úhel α je úhel měřený v chodu hodinových ručiček od tenzometru *A* k hlavnímu napětí σ_1. Jelikož však je funkce arctg nejednoznačná musíme o velikosti úhlu rozhodnout i podle znamének čitatele a jmenovatele v rovnici (20) dle tabulky 1.

T	+	+	-	-
Q	+	-	-	+
α $[1^0]$	$0 \div 45$	$45 \div 90$	$90 \div 135$	$135 \div 180$

Tab. 1: Určení úhlu natočení hlavních napětí

2.1 Vlastní postup při měření:

1. Nalepení tenzometrické růžice.
2. Připájení tenzometrů, připojení k indikátoru a elektrické vyvážení měřícího zařízení.
3. Vyvrtání potřebného otvoru uprostřed tenzometrické růžice.
4. Odečtení uvolněných deformací korespondujících se zbytkovým napětím.
5. Užití vztahů (14), (15), (16), (17), (19) a (20) pro výpočet velikostí a směrů hlavních napětí.

2.2 Výhody a nevýhody odvrtávací metody

A) Výhody

- poměrně malé poškození součásti
- umožňuje měřit velikost hlavních napětí i jejich směr
- nízká cena zařízení a jeho mobilita

- možnost měření gradientu napětí po hloubce (měření nehomogenního napětí po hloubce)
- snadná proveditelnost
- možnost použití na různé druhy materiálů

B) Nevýhody

- měření zbytkových napětí přibližně do 0,6 meze kluzu z důvodu vzniku plastických deformací v okolí otvoru
- možnost ovlivnění provozního napěťového stavu součásti při neodstranění otvoru
- nebezpečí vnesení parazitních napětí při vrtání otvoru a tím snížení přesnosti měření
- nepřesnost měření vlivem nedodržení předepsané geometrie otvoru

2.3 Možnosti určení kalibračních koeficientů

Určení kalibračních koeficientů pro homogenní napjatost po hloubce materiálu je možno provést několika způsoby. Pro určování homogenní napjatosti po hloubce materiálu a pro otvor, který prostupuje celé měřené těleso můžeme koeficienty určit analyticky. Pro neprůchozí otvor jsme nuceni použít numerické metody nebo experiment. V dalším se zaměříme na určování koeficientů numericky pomocí metody konečných prvků (MKP) pomocí programu ANSYS. Kalibrační koeficienty pro určování homogenní napjatoti jsou funkcí mnoha parametrů – např.:

- hloubky vrtaného otvoru
- průměru vrtaného otvoru
- poloměru a tvaru tenzometrické růžice
- tvaru a umístění otvoru (ovalita, excentricita, zaoblení kořene otvoru, …)
- velikosti měřeného tělesa
- zakřivení povrchu měřené součásti

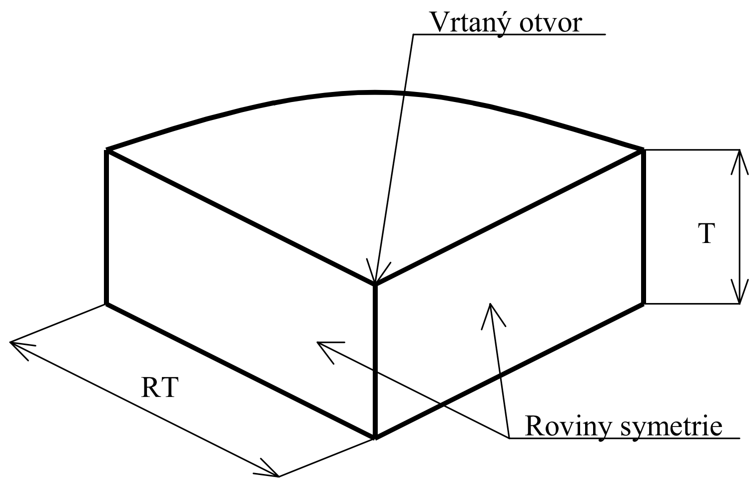
3. Model MKP pro určení koeficientů

Vytvoření modelu bude spočívat ve stanovení velikosti všech podstatných veličin určujících počítané kalibrační koeficienty. Mezi tyto veličiny patří geometrie modelu tělesa, zatížení, materiálové vlastnosti, vnější vazby, topologie a počet prvků MKP a vyšetřovaná deformace v místě tenzometru. Velikosti hodnot těchto veličin, které budou tvořit model tělesa (resp. jednotlivé dílčí modely), jsou určeny níže.

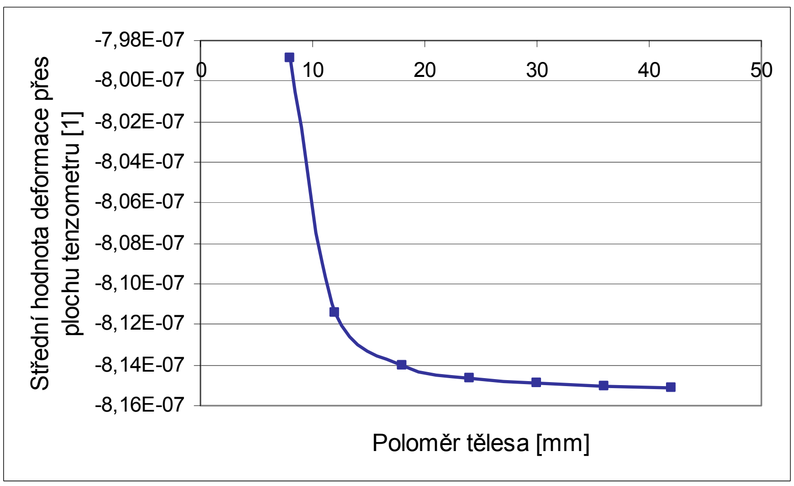
3.1 Geometrie modelu tělesa

Tvar tělesa pro určení kalibračních koeficientů by teoreticky mohl být libovolný. Pro jednoduchost je zvoleno těleso tvaru válce. Rozměry tohoto válce musí být dostatečně velké, aby počítané koeficienty nezávisely na rozměrech tělesa. Rozměry tohoto válce budou označeny *RT* – vnější poloměr válce a *T* – tloušťka. Jelikož bude tento model zatěžován symetrickým silovým působením, bude pro řešení postačující pouze jedna čtvrtina tělesa. Tímto dojde k významnému zkrácení výpočetního času. Při výpočtu se bude postupně zvětšovat hloubka otvoru. Přírůstek této hloubky bude dle [1] Δz = 0,127 mm, resp. při zavedení poměrné hloubky otvoru $\Delta h = \frac{z}{R_m} = 0{,}05$ (Kde R_m je střední poloměr tenzometrické růžice). Maximální hloubka otvoru bude: $z_{max.}$ = 1,27 mm, resp. $h_{\max} = \frac{z_{\max}}{R_m} = 0{,}5$. Dále proběhne výpočet pro různé poloměry otvoru – od 0,75 mm do 1,3 mm na pět kroků tj. s krokem 0,1375 mm.

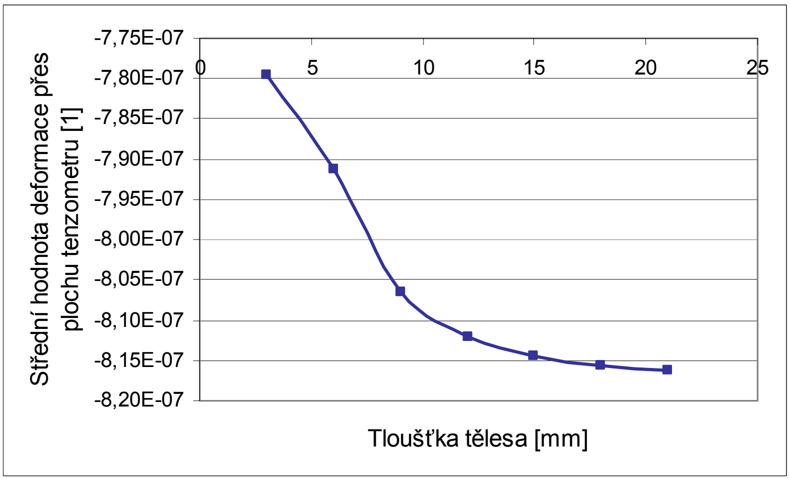
Určení vhodných rozměrů *RT* a *T* bude provedeno opakovaným výpočtem při postupném zvětšování *RT* a následně *T* při současném výpočtu deformace, která je stanovena jako střední hodnota přes plochu mřížky tenzometru (viz níže 3.8). Až se tato deformace, kterou zobrazíme v závislosti na těchto rozměrech (viz graf 1 a 2) dostatečně ustálí (změna deformace v daném kroku bude menší jak 0,1 % oproti kroku předcházejícímu), dané rozměru budou považovány za přijatelné.



Obr. 4: Geometrie výpočtového modelu



Graf 1: Závislost vypočtené deformace na poloměru tělesa *RT*.

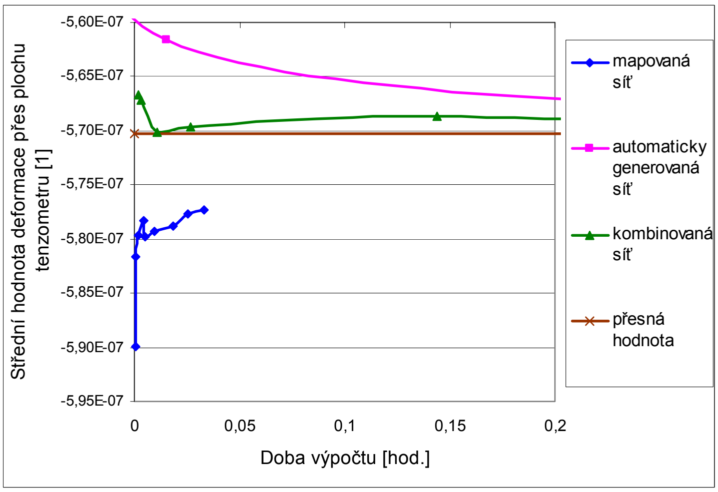


Graf 2: Závislost vypočtené deformace na tloušťce tělesa *T*.

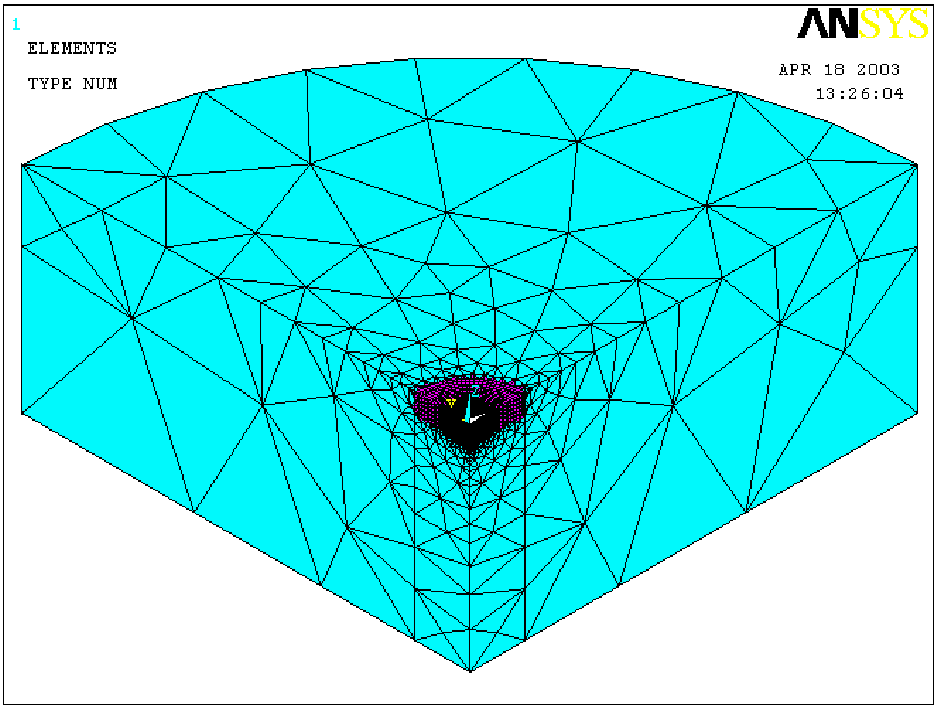
Tyto grafy byly stanoveny pro poloměr vrtaného otvoru R_0 = 0,8 mm. Pro tento otvor by byly dostatečné rozměry: T = 20 mm a RT = 32 mm. Čím však bude poloměr otvoru např. větší, bude muset být větší i poloměr tělesa RT. Proto tyto hodnoty (T = 20 mm a RT = 32 mm) mohou být více zobecněny (bude omezena závislost na poloměru otvoru) zavedením poměru $T/R_0 = 25$ a $RT/R_0 = 40$.

3.2 Model topologie prvků MKP

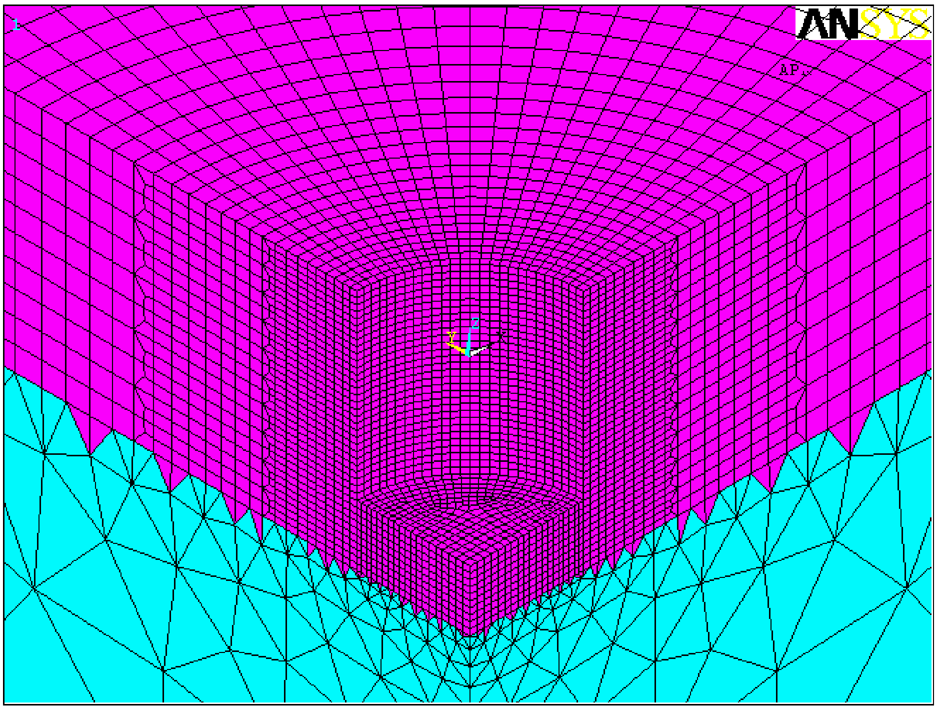
Pro určení vhodného uspořádání prvků bylo zvoleno několik variant sítí – automaticky generovaná síť tvořená čtyřstěnnými prvky, mapovaná síť a jejich kombinace. Výběr té nejvhodnější je proveden pomocí grafu 3, ve kterém je na svislé ose vypočtená deformace a na vodorovné doba výpočtu. Nejrychleji konverguje deformace určená z modelu vytvořeného kombinací automaticky generované a mapované sítě, která tedy byla zvolena. Model této sítě ukazuje obr. 5. K výpočtu byl použit prvek SOLID 95, což je prvek, který má pro šestistěnnou konfiguraci 20 uzlových bodů.



Graf 3: Závislost vypočtené deformace v místě tenzometru na době výpočtu pro různé varianty sítě MKP.



Obr. 5: Zvolená síť prvků celého tělesa



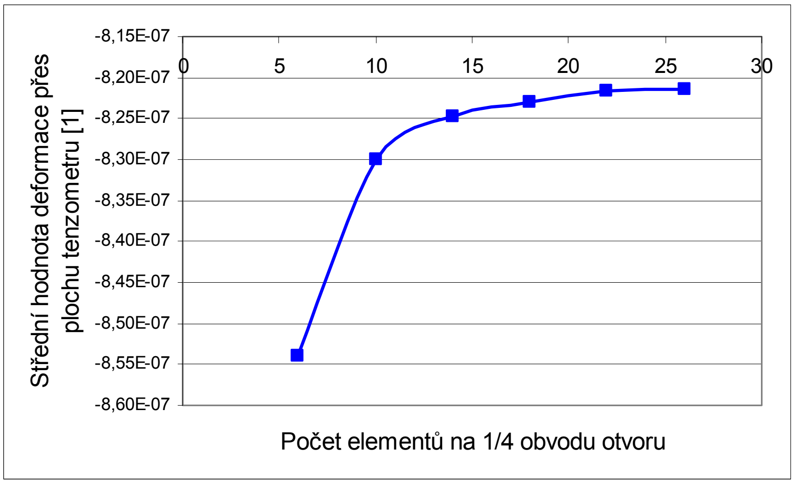
Obr. 6: Zvolená síť prvků – detail otvoru

3.3 Poměry prvků modelu tělesa

Rozměry jednotlivých prvků se směrem k okrajům tělesa zvětšují tak, aby se tvar prvku co možná nejvíce v každém místě podobal krychli, resp. pravidelnému čtyřstěnu.

3.4 Počet prvků modelu tělesa

Při určování počtu prvků modelu byl prováděn opakovaný výpočet deformace se zvětšujícím se počtem elementů. Až byla deformace dostatečně ustálená (do 0,1 %), byl považován počet prvků za dostatečný – graf 4. Počet prvků byl určován zadáváním počtu prvků po obvodu ¼ válce. Dostatečný počet elementů po obvodu válce je 26 elementů. Celkový počet elementů pro poloměr otvoru 0,8 mm je tedy přibližně 21 000, tj. přibližně 72 000 uzlových bodů a 212 000 řešených rovnic.



Graf 4: Závislost vypočtené deformace v místě tenzometru na počtu elementů.

3.5 Model zatížení

Kalibrační koeficienty *a* a *b* budou určeny pomocí rovnice (1) dle známého napětí (σ_I, σ_{II}) a vypočtené deformace. Aby bylo možno určit tyto dvě neznámé (*a*,*b*), je třeba mít k dispozici dvě rovnice, které se získají z uvedené rovnice pro dvoje různá zatížení. Nejvhodnějším zatížením je takové, při kterém se vždy eliminuje jeden z koeficientů. Takovým případem je rovnoosá napjatost – pro určení koeficienty *a* a smyková napjatost – pro určení koeficienty *b*. Při takovémto zatížení se obdrží dvě nezávislé rovnice, čímž se sníží numerická chyba výpočtu.

a) Zatížení pro koeficient *a* – vyvolání rovnoosé napjatosti

$$\sigma_I = \sigma_{II} \tag{21}$$

Po dosazení (21) do rovnice (1) dostáváme:

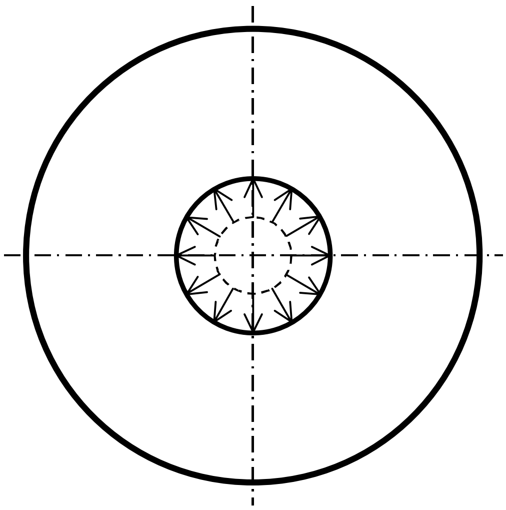
$$\varepsilon_r = \frac{1+\mu}{E} a\sigma_I \tag{22}$$

a z této rovnice vyjádříme koeficient *a*

$$a = \frac{E}{(1+\mu)\sigma_I}\varepsilon_r \ . \tag{23}$$

V praxi se však měří střední hodnota deformace přes plochu tenzometrické mřížky a proto i při tomto výpočtu pomocí MKP musí být určena tato stření hodnota deformace $\overline{\varepsilon}$. Potom dostáváme:

$$\overline{a} = \frac{E}{(1+\mu)\sigma_I}\overline{\varepsilon}_r \tag{24}$$



Obr. 7: Těleso zatížené plošným zatížením vyvolávající rovnoosou napjatost v místě vrtaného otvoru pro určení koeficientu *a*.

b) Zatížení pro koeficient *b* – vyvolání smykové napjatost

$$\sigma_I = -\sigma_{II} \tag{25}$$

Po dosazení (25) do rovnice (1) dostáváme:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} b\sigma_I \cos 2\alpha \tag{26}$$

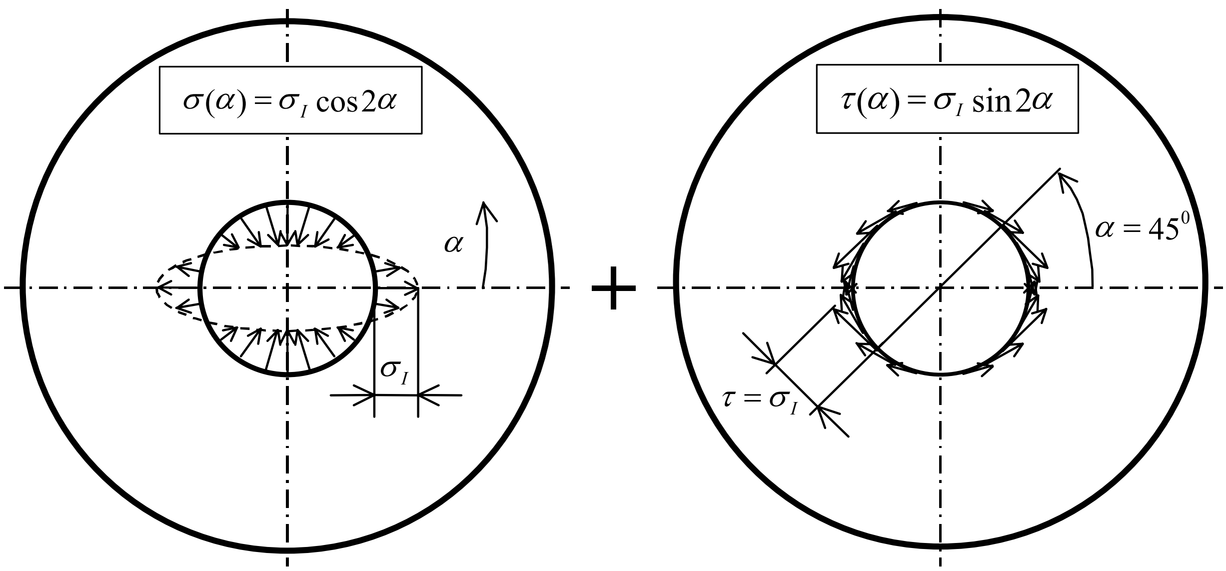
a z této rovnice vyjádříme koeficient *b*

$$b = \frac{E}{\sigma_I \cos 2\alpha} \varepsilon_r \qquad (27)$$

pro střední hodnotu deformace přes plochu tenzometrické mřížky dostáváme:

$$\bar{b} = \frac{E}{\sigma_I \cos 2\alpha} \bar{\varepsilon}_r \qquad (28)$$

Zatížení bude realizováno jednotkovým plošným zatížením uvnitř otvoru, čímž se získá přímo uvolněná deformace (je tedy vidět, že kalibrační koeficienty jsou deformací při takovém zatížení, které vyvolá rovnoosou resp. smykovou napjatost o velikosti 1 MPa).



Obr. 8: Těleso zatížené plošným zatížením vyvolávající smykovou napjatost v místě vrtaného otvoru pro určení koeficientu *b*.

3.6 Model vazeb

Při řešení byla využita symetrie tělesa, zatížení a materiálových vlastností a byla modelována pouze ¼ tělesa (viz obr. 4). Proto na roviny symetrie byly použity symetrické vazby. Aby těleso nebylo vázáno staticky přeurčeně, byly užity vazby na spodní části tělesa ve zbývajícím volném směru.

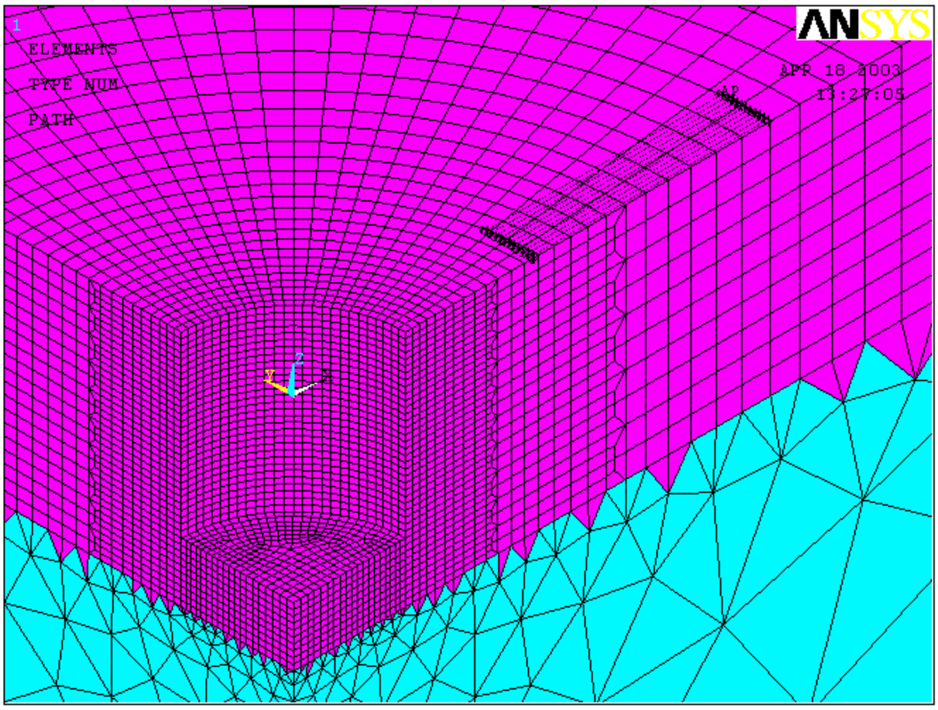
3.7 Model materiálu

Předpokládaný materiál pro výpočet je ocel namáhaná v lineární oblasti (do meze kluzu). Proto tento materiál může být popsán pouze dvěmi pružnostními charakteristikami:

- modulem pružnosti: E = 210000 MPa
- Poissonovým číslem: μ = 0,3

3.8 Způsob určení deformace

Deformace musí být určena v souhlase s experimentem, tj. jako střední hodnota přes plochu mřížky tenzometru. Při těchto výpočtech byla tato střední hodnota deformace stanovena tak, že byla určena deformace ve směru podélné osy tenzometru (ne ve směru radiálním) v jednotlivých bodech mřížky tenzometru (obr. 9). Následně byl vypočítán (numericky) integrál součinu této deformace a přírůstku délky vinutí mřížky tenzometru. Střední hodnota deformace je pak rovna podílu tohoto integrálu a celkové délky vinutí mřížky tenzometru dle vztahu (29).



Obr. 9: Mřížka tenzometru.

$$\bar{\varepsilon}_r = \frac{\int_0^l \varepsilon \cdot dl}{l} \tag{29}$$

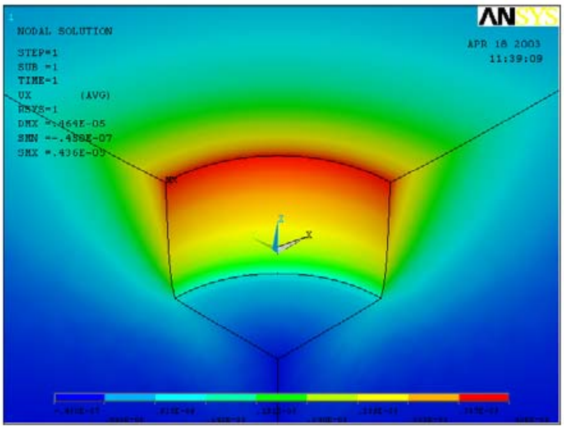
kde $\bar{\varepsilon}_r$ střední hodnota deformace na ploše tenzometru

ε deformace v bodech mřížky tenzometru ve směru podélné osy tenzometru

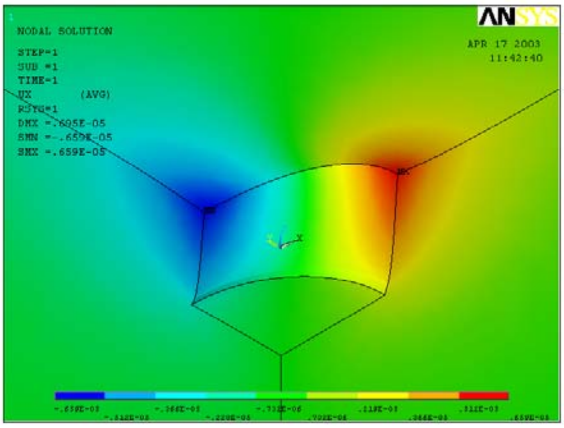
l, dl délka vinutí tenzometrické mřížky resp. přírůstek délky vinutí mřížky.

4. Výpočet kalibračních koeficientů

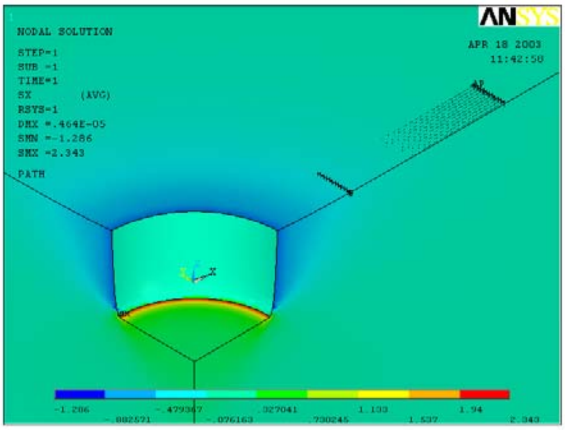
K určení kalibračních koeficientů byla provedena série výpočtů deformace pro příslušné hloubky a poloměry průměru vrtaného otvoru. Napjatostní a deformovaný stav tělesa s otvorem při rovnoosé a smykové napjatosti (pro určení koeficientu *a*, resp. *b*) uvádí několik následujících obrázků.



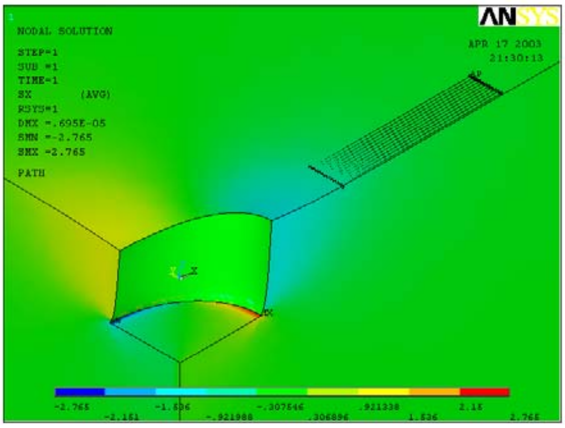
a)



b)



c)



d)

a) Deformace pro případ rovnoosé napjatosti - pro určení koeficientu *a*

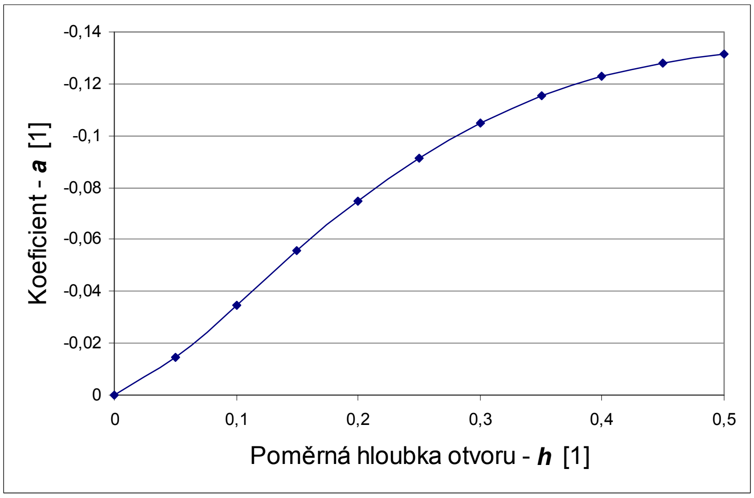
b) Deformace pro případ smykové napjatosti - pro určení koeficientu *b*

c) Radiální napětí pro případ rovnoosé napjatosti

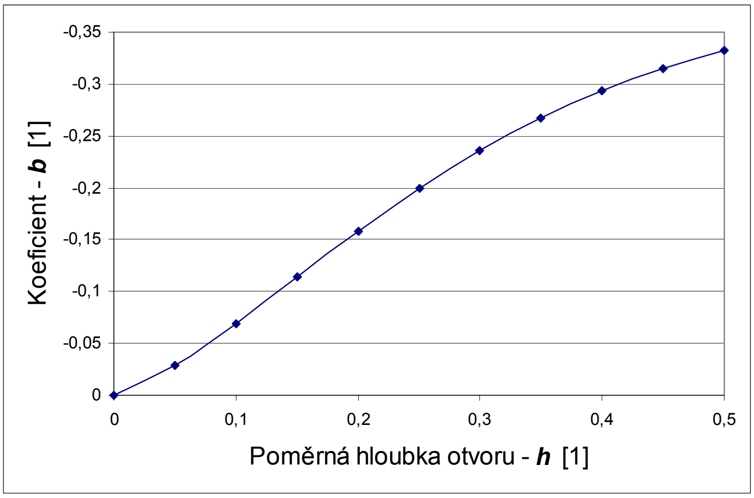
d) Radiální napětí pro případ smykové napjatosti

Obr. 10: Napjatostní a deformační stav tělesa při určování koeficientů.

Hledané koeficienty z vypočtených deformací se stanoví z výše uvedených vztahů (24) a (28). Následující graf 5, resp. 6 ukazuje nalezené kalibrační koeficienty *a*, resp. *b* pro průměr otvoru D_0 = 1,6 mm v závislosti na poměrné hloubce otvoru.



Graf 5: Kalibrační koeficient *a* pro průměr otvoru 1,6 mm v závislosti na poměrné hloubce otvoru.

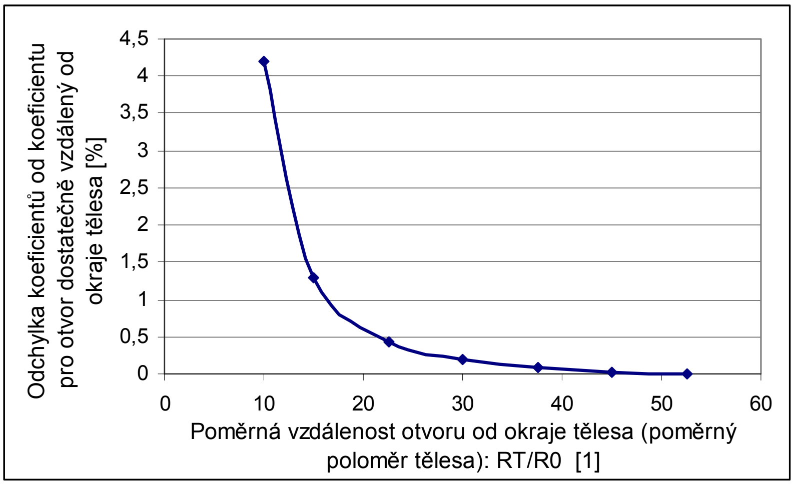


Graf 6: Kalibrační koeficient *b* pro průměr otvoru 1,6 mm v závislosti na poměrné hloubce otvoru.

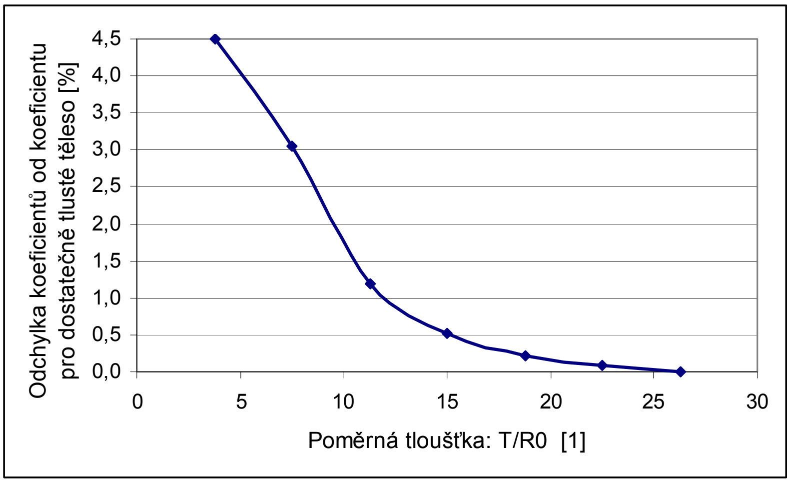
Na základě těchto koeficientů jsme schopni určit homogenní zbytkové napětí po hloubce měřeného materiálu pro libovolnou hloubku a průměr otvoru. Pokud by se v materiálu vyskytovalo nehomogenní napětí, tímto výpočtem (pomocí těchto koeficientů) bychom určili ekvivalentní rovnoměrnou hodnotu zbytkového napětí. Rovnoměrné ekvivalentní napětí je takové homogenní napětí, které způsobí stejnou měřenou deformaci jako vyskytující se nehomogenní zbytkové napětí.

4.1 Vliv konečných rozměrů na velikost kalibračních koeficientů

Jak již bylo řečeno, kalibrační koeficienty závisí na rozměrech tělesa, na kterém probíhá výpočet. Těmito rozměry jsou tloušťka *T* a poloměr tělesa *RT*, který v praxi odpovídá vzdálenosti vrtaného otvoru od okraje tělesa. Odchylku koeficientů v % od koeficientu určeného pro dostatečně velké těleso v závislosti na rozměrech tělesa udávají níže uvedené grafy. Aby toto bylo možné více zobecnit, na vodorovné ose vynáším poměrnou tloušťku = T/R_0 a poměrný poloměr tělesa = RT/R_0. Tyto grafy jsou určeny pro největší hloubku otvoru, tj. 1,27 mm.



Graf. 7: Citlivost koeficientů na konečný poloměr tělesa



Graf. 8: Citlivost koeficientů na konečnou tloušťku tělesa

Z těchto grafů můžeme usoudit, že např. pro chybu koeficientů 1 % zvlášť pro tloušťku tělesa a jeho poloměr (což by mohlo být přijatelné pro praxi), je třeba mít minimální poměrnou tloušťku tělesa 12 a poměrný poloměr tělesa 17. To znamená, že např. pro průměr otvoru 1,6 mm by bylo vhodné těleso o minimální tloušťce přibližně 10 mm a poloměru přibližně 14 mm. Je nutné upozornit, že tyto odchylky jsou chyby pouze koeficientů z důvodu konečných rozměrů tělesa uvažovaných nezávisle.

5. Závěr:

V tomto článku byla rozebrána odvrtávací metoda pro měření homogenního zbytkového napětí. Byl vytvořen vhodný model MKP pomocí něhož byly při patřičném zatížení určeny deformace, ze kterých byly stanoveny kalibrační koeficienty. Kalibrační koeficienty pro použití odvrtávací metody pro zjišťování homogenní zbytkové napjatosti byly určeny pro určité různé hloubky otvoru (max. hloubka otvoru je 1,27 mm, 10 rovnoměrných kroků) a pro různé průměry otvoru (od 1,5 mm do 2,6 mm na pět kroků). Tyto výsledky je možné aproximovat a použít pro libovolnou hloubku a průměr otvoru. Pro odhad chyby koeficientů z důvodu numerického řešení jsem provedl jeden přesnější výpočet s větším počtem elementů (52 000 elementů, tj. 170 000 nódů, 500 000 řešených rovnic – 4krát delší výpočetní čas). Tyto přesnější koeficienty se lišily od původních pouze o 0,15%. Za daných předpokladů výpočtu s uvážením nepřesností dalších parametrů ovlivňujících koeficienty (např. omezené rozměry tělesa) je možno říci, že předpokládaná chyba koeficientů je do 1%.

Celkový výpočetní čas potřebný pro určení koeficientů pro všechny průměry a hloubky otvoru (pro určení 100 koeficientů) při použití PC s 1,8 GHz procesorem a operační pamětí 512 MB byl přibližně 20 hodin.

Koeficienty byly určeny za předpokladu, že napětí v rovinách rovnoběžných s povrchem v různých hloubkách je konstantní. Pokud by vypočtené napětí vyšlo podstatně nekonstantní (nehomogenní), je nutno použít některou z metod pro určování nehomogenního zbytkového napětí - např. integrální metodu (připravováno k publikaci).

Literatura

[1] 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, str. 338-349, 1988

[2] Jian Lu: *Handbook of Measurement of Residual Stresses,* Society for Experimental Mechanics, The Fairmont Press, Inc., Lilburn, 1996

[3] Vishay Measurement Group: *Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method,* Measurement Group Inc., 1993

[4] Dejmal, J.: *Aplikace moderních metod experimentální analýzy napětí pro určování vnitnřích pnutí*, ČVUT FS, 1999