VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Ing. Karel Švaříček

VYUŽITÍ NUMERICKÝCH SIMULACÍ A NEURONOVÝCH SÍTÍ KE ZDOKONALENÍ ODVRTÁVACÍ METODY ZJIŠŤOVÁNÍ ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI

DEVELOPMENT OF THE HOLE DRILLING METHOD FOR RESIDUAL STRESS MEASUREMENT BY MEANS OF NUMERICAL SIMULATIONS AND NEURAL NETWORKS

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor:	Inženýrská mechanika
Školitel:	Doc. Ing. Miloš Vlk, CSc.
Oponenti:	Prof. Ing. Stanislav Holý, CSc. Prof. Ing. Pavel Macura, DrSc. Prof. Ing. František Plánička, CSc.
Datum obhajoby:	9. 5. 2007

KLÍČOVÁ SLOVA
zbytková napjatost, metoda vrtání otvoru, nehomogenní napjatost po hloubce, excentrický otvor, nejistoty, pružně plastické deformace, numerická simulace, neuronová síť

KEY WORDS
residual stress, hole drilling method, depth variation stress, eccentric hole, uncertainties, elastic-plastic strain, numerical simulation, neural network

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Technická 2896/2, Brno 616 69

© Karel Švaříček, 2007
ISBN 978-80-214-3456-1
ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD 5
2 PROBLÉMOVÁ SITUACE A CÍLE ŘEŠENÍ 5
2.1 Problémové situace 5
2.2 Cíle disertační práce 5
3 METODA VRTÁNÍ OTVORU 6
3.1 Původní předpoklady metody vrtání otvoru 7
4 VÝPOČTOVÝ MODEL 8
5 RESPEKTOVÁNÍ NEHOMOGENNÍ NAPJATOSTI PO HLOUBCE 9
5.1 Integrální metoda 9
5.2 Příčinková funkce 10
6 RESPEKTOVÁNÍ EXCENTRICITY VRTANÉHO OTVORU VZHLEDEM KE STŘEDU TENZOMETRICKÉ RŮŽICE 13
7 ROZVOJ METODY VRTÁNÍ OTVORU DO OBLASTI PRUŽNĚ PLASTICKÝCH DEFORMACÍ POMOCÍ NEURONOVÝCH SÍTÍ 15
7.1 Neuronová síť 15
7.2 Trénování neuronových sítí 16
7.3 Testování neuronové sítě 16
7.4 Spojování neuronových sítí 17
8 ROZVOJ METODY VRTÁNÍ OTVORU DO OBLASTI PRUŽNĚ PLASTICKÝCH DEFORMACÍ POMOCÍ ITERAČNÍHO ŘEŠENÍ METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ 19
8.1 Podstata iteračního řešení zbytkové napjatosti 20
8.2 Výpočet zbytkové napjatosti iteračním řešením – průchozí otvor ve stěně 22
8.3 Výpočet zbytkové napjatosti iteračním řešením – neprůchozí otvor v masivním tělese 23
9 STANOVENÍ NEJISTOT VYPOČTENÉ ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI A JEJÍ CITLIVOSTI NA VSTUPNÍCH PARAMETRECH 24
9.1 Citlivostní analýza 25
9.2 Nejistoty zbytkové napjatosti 25
10 ZÁVĚR 26
10.1 Dosažené cíle práce 26
10.2 Přínos práce pro vědu a praxi 27
LITERATURA 27
ŽIVOTOPIS 31
ABSTRAKT 32

1 ÚVOD

Zbytková napětí jsou napětí, která působí v součásti trvale bez vnějšího zatěžování jako důsledek předchozích technologických procesů. Těmito technologiemi, které způsobují zbytkovou napjatost, mohou být: odlévání, kování, svařování, tepelné zpracování, tažení, válcování, kuličkování a další. Zbytková napětí ovlivňují napjatost tělesa od vnějšího zatěžování. Při vnějším silovém působení mohou tato zbytková napětí mít škodlivý nebo i užitečný vliv. Jednou z nejpoužívanějších metod pro měření zbytkové napjatosti je metoda vrtání otvoru (viz kap. 3).

2 PROBLÉMOVÁ SITUACE A CÍLE ŘEŠENÍ

Z provedené rešeršní studie plyne, že mezi vlivy, které mají podstatný vliv na měření zbytkové napjatosti metodou vrtání otvoru a které je tudíž nutné zahrnout do výpočtů, jsou nehomogenita napětí po hloubce, excentricita otvoru vzhledem ke středu tenzometrické růžice a pružně plastické deformace, vznikající v okolí vrtaného otvoru. Ani např. norma ASTM [1] výše uvedené podstatné faktory neřeší. Dále není zcela zřejmé, jaké jsou nejistoty vypočtené zbytkové napjatosti.

Metod pro určování nehomogenní zbytkové napjatosti po hloubce a pro respektování excentricity je mnoho. Většina metod, uvažující pružně plastické deformace, se zabývá buď jen odhadem chyb nebo jen jednoduchými postupy pro výpočet zbytkové napjatosti pro specifické případy (např. jednoosá napjatost, hliník, stěna s průchozím otvorem). Proto zde vyvstává následující disertabilní problém.

2.1 PROBLÉMOVÉ SITUACE

Není jasno v tom, která metoda pro měření nehomogenní zbytkové napjatosti po hloubce a pro respektování excentricity otvoru je nejvhodnější a zda jsou tyto metody schopny plně a s dostatečnou přesností postihnout daný problém (nehomogenitu, excentricitu). Bylo by možné vytvořit novou metodu, která by řešila problém pružně plastických deformací v okolí vrtaného otvoru jiným způsobem než v publikovaných pracích, kde se jeví jako ne zcela uspokojivě vyřešena? Jak velké jsou nejistoty vypočtené zbytkové napjatosti a jaká je citlivost zbytkové napjatosti pro jednotlivé vstupní parametry? Problémová situace tedy je: měřit zbytkovou napjatost metodou vrtání otvoru s pokud možno malými a stanovenými nejistotami.

2.2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

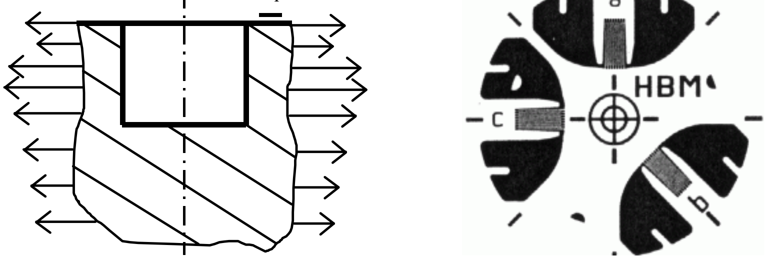
- Výběr vhodných metod pro určení nehomogenní zbytkové napjatosti po hloubce a pro výpočet zbytkové napjatosti, je-li otvor vyvrtán excentricky vzhledem ke středu tenzometrické růžice.

- Rozbor principu vybraných metod, ověření jejich správnosti, přesnosti a obecnosti (tj. použitelnosti pro různé vstupní parametry) v dané problematice. Aplikace těchto metod na výpočet zbytkové napjatosti pomocí numerických simulací s použitím metody konečných prvků (tj. výpočet zbytkové napjatosti na základě stanovených kalibračních koeficientů pro RY 61 S a určených uvolněných deformací).
- Vytvoření nové výstižnější metody, umožňující výpočet zbytkové napjatosti v případě, že v okolí otvoru dochází k pružně plastickým deformacím. Prokázat její správnou funkci, přesnost a použitelnost.
- Stanovit nejistoty a citlivost vypočtené zbytkové napjatosti pro nejisté vstupní parametry.

3 METODA VRTÁNÍ OTVORU

Tato metoda je založena na měření uvolněných deformací, které vzniknou odvrtáním malého, zpravidla mělkého otvoru (obr. 1). Tyto deformace jsou obvykle měřeny pomocí tenzometrické růžice (obr. 1), nalepené na povrchu 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 deformace ve třech různých směrech. Vztah mezi změřenými deformacemi a zbytkovými napětími je při splnění základních předpokladů (homogenní, izotropní, lineárně pružný materiál) lineární (1). Pro určení zbytkových napětí z uvolněných deformací je třeba znát kalibrační koeficienty, resp. příčinkové funkce, které vystupují v tomto vztahu.

Metoda vrtání otvoru umožňuje analyzovat makroskopickou rovinnou zbytkovou napjatost v různých materiálech, která nás v praxi zajímá nejvíce. Stanovení zbytkové napjatosti v praxi je možné do hloubky 0,3 až 0,4 násobku středního poloměru tenzometrické růžice pro nehomogenní napjatost po hloubce [24], resp. do hloubky 0,8 násobku středního poloměru tenzometrické růžice pro homogenní napjatost po hloubce [1]. Průměr vrtaného otvoru se obvykle pohybuje od 1 mm do 4 mm [31].



Obr. 1 Schéma vrtaného otvoru a tenzometrická růžice RY 61 S

Vztah mezi měřenou uvolněnou radiální deformací a hlavními zbytkovými napětími pro libovolný směr α je:

$$\varepsilon_r = A(\sigma_I + \sigma_{II}) + B(\sigma_I - \sigma_{II})\cos 2\alpha \qquad (1)$$

Pro jednotlivé deformace (ε_A, ε_B, ε_C), změřené tenzometrickou růžicí s tenzometry po 45° proti směru chodu hodinových ručiček dle obr. 1 a po transformaci těchto deformací dle (2), můžeme tento vztah (1) psát ve tvaru (3).

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

$$p = -\frac{1+\mu}{E} aP \quad q = -\frac{1}{E} bQ \quad t = -\frac{1}{E} bT \qquad (3)$$

Z rovnic (3) můžeme vyjádřit transformovaná napětí (P, Q, T) a následně velikosti hlavních napětí a jejich natočení dle (4). Úhel α je potom kladný úhel, měřený ve směru chodu hodinových ručiček od tenzometru A k hlavnímu napětí σ_I.

$$\sigma_I, \sigma_{II} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \qquad \alpha = \frac{1}{2}\operatorname{arctg}\left(\frac{T}{Q}\right) = \frac{1}{2}\operatorname{arctg}\left(\frac{-t}{-q}\right) \qquad (4)$$

Výše uvedený postup a vztahy, které jsou normovány dle ASTM E-837-01 [1], platí za níže uvedených předpokladů.

3.1 PŮVODNÍ PŘEDPOKLADY METODY VRTÁNÍ OTVORU

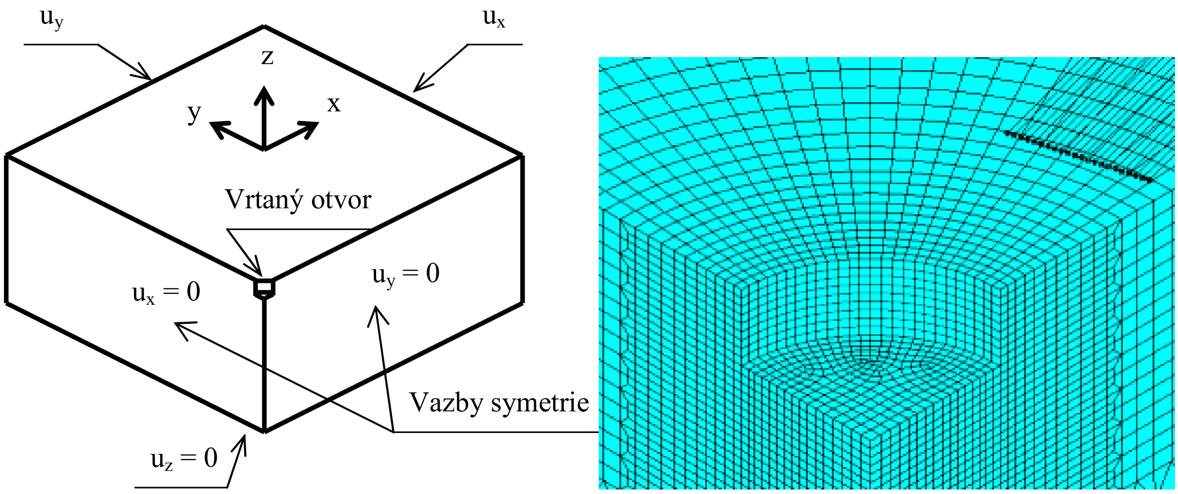
Předpoklady, ze kterých plyne omezení použitelnosti metody vrtání otvoru, byly a jsou již během několika desítek let úspěšně eliminovány řadou autorů a tím dochází k rozšiřování použitelnosti této metody. Výčet původních předpokladů při vzniku metody vrtání otvoru je následující (v závorkách jsou uvedeny publikace, ve kterých byl daný předpoklad úspěšně eliminován):

- homogenní [32], [28], izotropní [6], [18], [26], lineárně pružný materiál [17], [3], [34], [48], [49], [56]
- nanejvýš dvojosá napjatost v rovinách rovnoběžných s povrchem (nulová napětí ve směru kolmém k povrchu vzorku, nulová smyková napětí mezi rovinami rovnoběžnými s povrchem) [33]
- zbytková napětí jsou homogenní (konstantní) podél hloubky tělesa [7], [23], [24], [4], [22], [2], [5], [36], [47], [53]
- zbytková napětí jsou homogenní (konstantní) v rovinách rovnoběžných s povrchem tělesa [9], [14], [20]
- otvor je umístěn centricky vzhledem ke středu tenzometrické růžice [29], [50], [51], [52], je kolmý k povrchu [16] a má tvar válce [27]
- povrch vzorku je rovinný [35], [13], [21]
- při vrtání otvoru nejsou vnesena další zbytková napětí [8], [10], [28]
- přesná geometrie tenzometrické mřížky [15], [25]

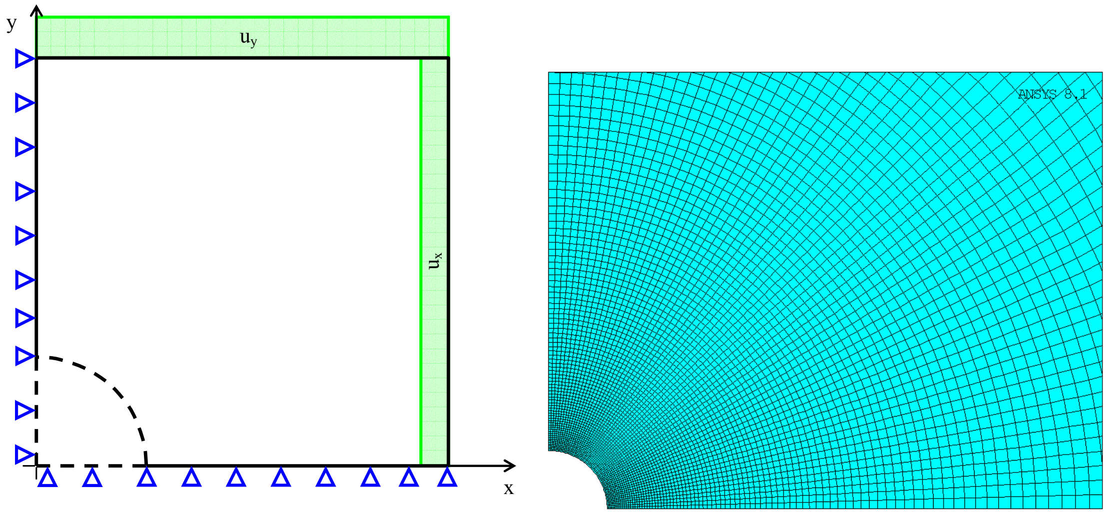
- otvor je umístěn v dostatečné vzdálenosti od geometrických nespojitostí (od okraje tělesa, od osazení či žeber, od drážek, od sousedních otvorů, apod.); tloušťka tělesa je natolik velká (vrtán neprůchozí otvor) nebo natolik malá (vrtán průchozí otvor), aby těmito rozměry nebyly ovlivněny uvolněné deformace [12], [11], [30], [19], [1], [41].

4 VÝPOČTOVÝ MODEL

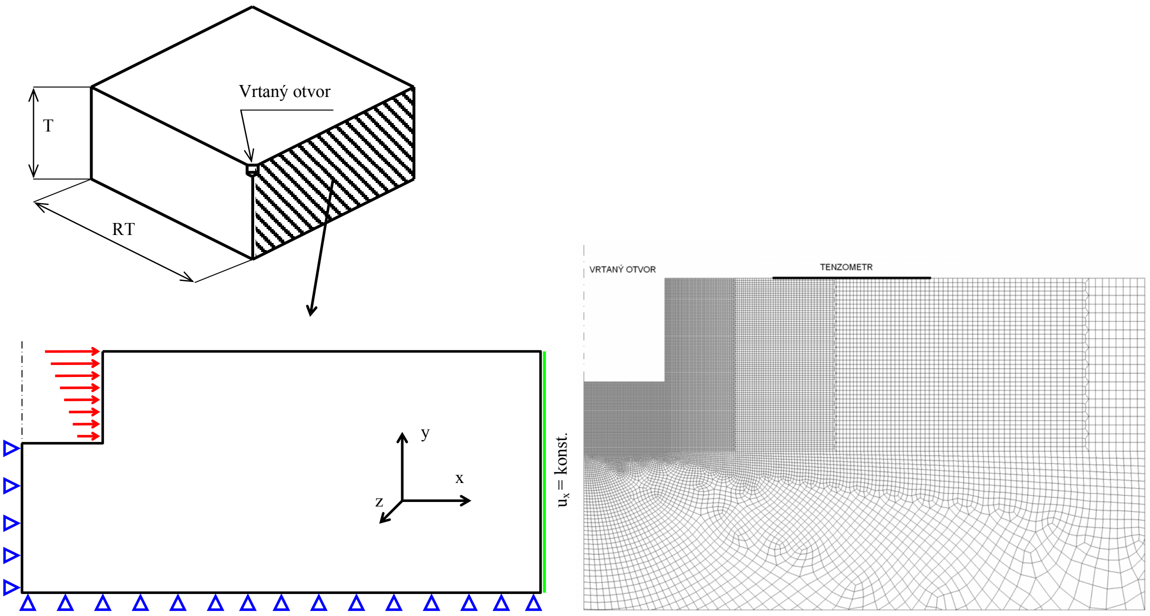
K vyřešení všech vytýčených cílů disertační práce bylo použito výpočtové modelování pomocí metody konečných prvků (MKP). Pro věrohodné výsledky byl vytvořen vhodný konečnoprvkový model, který se skládá z dílčích modelů geometrie, materiálů, vazeb, zatížení, vhodné konečnoprvkové sítě (typ prvků, jejich počet a topologie) a v neposlední řadě vyhodnocování vhodným způsobem potřebných veličin (napětí, resp. deformací přes plochu tenzometrické mřížky v požadovaném směru).



Obr. 2 3D výpočtový model



Obr. 3 2D výpočtový model stěny



Obr. 4 2D osově symetrický výpočtový model

Z důvodu řešení několika problémových situací a z důvodu ověření výsledků bylo zvoleno několik různých konečnoprvkových modelů. Byl použit 3D model (obr. 2), 2D model stěny (obr. 3) a 2D osově symetrický model (obr. 4). 3D model byl použit pro analýzu zbytkové napjatosti v oblasti pružně plastických deformací. 2D model stěny byl použit pro analýzu zbytkové napjatosti pro případ s průchozím i excentrickým otvorem a pro případ pružně plastických deformací. 2D geometricky osově symetrický model, který může být neosově symetricky zatížen dle koeficientů Fourierovy řady, byl použit pro případ nehomogenní zbytkové napjatosti po hloubce i s excentrickým otvorem. Výpočtové modely byly vytvořeny v programu ANSYS verze 8.1 a 10.0.

5 RESPEKTOVÁNÍ NEHOMOGENNÍ NAPJATOSTI PO HLOUBCE

Norma ASTM E-837-01 [1] uvádí pouze vztahy pro výpočet homogenní napjatosti po hloubce. Vhodnými metodami pro určování nehomogenní napjatosti po hloubce jsou: integrální metoda, metoda mocninných řad, příp. metoda spline-funkcí a metoda exponenciální. Tyto metody zobecňuje zavedení příčinkové funkce. Vzhledem k tomu, že integrální metoda je jednou z nejpoužívanějších metod a použití příčinkové funkce je zase zobecněním uvedených metod, zaměříme se právě na tyto dvě. Tato problematika se opírá o publikace autorů [23], [24] a [5].

5.1 INTEGRÁLNÍ METODA

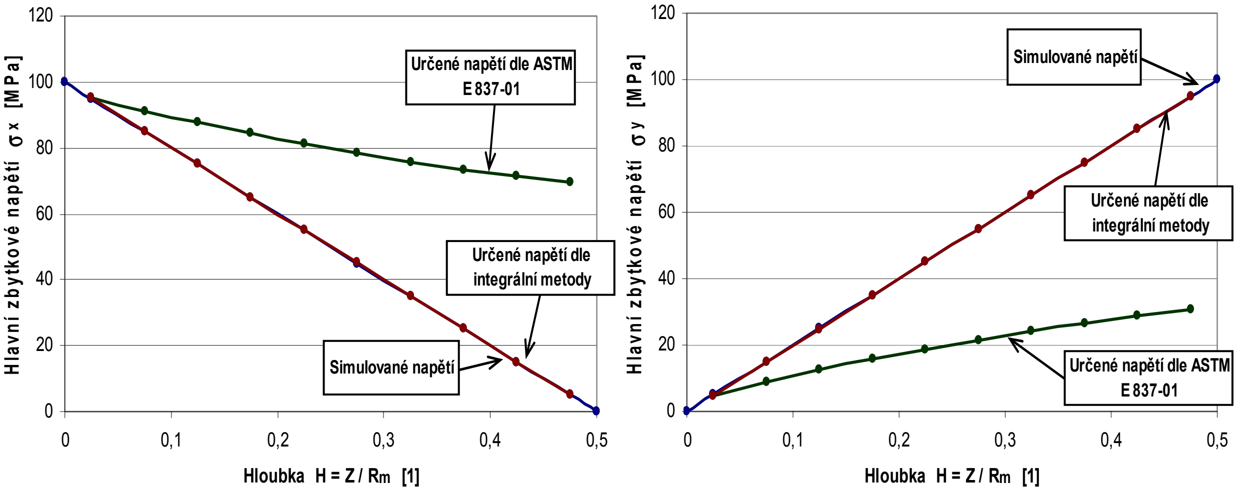
Integrální metoda předpokládá, že uvolněná deformace p_i při určité hloubce otvoru, je dle zákona superpozice součtem všech dílčích deformací p_{ij} od všech dílčích

napětí P_j, působících v rozmezí diskrétních přírůstků hloubky otvoru. Potom skalární vztahy (3) mezi uvolněnými deformacemi a zbytkovými napětími přejdou na maticový zápis dle (5).

$$\mathbf{p} = -\frac{1+\mu}{E}\mathbf{aP} \quad \mathbf{q} = -\frac{1}{E}\mathbf{bQ} \quad \mathbf{t} = -\frac{1}{E}\mathbf{bT} \qquad (5)$$

Vhodným způsobem pro stanovení kalibračních koeficientů a_{ij} a b_{ij} je použití metody konečných prvků. K určení těchto kalibračních koeficientů byl použit 2D geometricky osově symetrický model osově nesymetricky zatěžovaný – viz kap. 4. Pomocí tohoto výpočtového modelu byly dále simulovány lineární průběhy zbytkových napětí po hloubce tak, jak je uvedeno např. na obr. 5. Na základě vypočtených uvolněných deformací byla stanovena zbytková napětí dle integrální metody a metody uvedené v ASTM – viz obr. 5.

Výsledky zbytkové napjatosti, určené integrální metodou, se v tomto případě shodují se simulovanou napjatostí. Zbytková napětí, určená dle ASTM E-837-01, jsou pro danou nehomogenní simulovanou zbytkovou napjatost výrazně odlišná a závisí na velikosti gradientu zbytkových napětí s hloubkou. Zbytková napětí, určená tímto způsobem v závislosti na hloubce, se přibližují simulovaným nehomogenním napětím, ovšem mají větší tendenci zůstat konstantní podle první hodnoty.



Obr. 5 Průběh simulovaných zbytkových napětí po hloubce a napětí určených dle ASTM a dle integrální metody

Lze tedy vidět, že americká norma ASTM E-837-01 skutečně není schopna postihnout nehomogenní napětí po hloubce tělesa a je nutno použít například právě uvedenou integrální metodu nebo metodu využívající příčinkové funkce.

5.2 PŘÍČINKOVÁ FUNKCE

Pro výpočet nehomogenní zbytkové napjatosti po hloubce např. integrální metodou nebo metodou mocninných řad je nutné před vlastním použitím těchto metod určit

kalibrační koeficienty pro každou metodu zvlášť. Určení těchto kalibračních koeficientů je obvykle značně časově náročné. Obecný pohled na výpočet zbytkových napětí metodou vrtání otvoru za dodržení základních předpokladů přináší zavedení příčinkové funkce tak, jak popsal Beghini [5]. Pomocí této příčinkové funkce mohou být jednoduše stanoveny kalibrační koeficienty jak pro integrální metodu, pro metodu mocninných řad, tak i pro libovolnou „novou“ metodu. Tato nová metoda by spočívala v aproximaci zbytkových napětí libovolnou funkcí, nejen po částech konstantní funkcí – jak je tomu u integrální metody – nebo mocninou funkcí – jak je tomu u metody mocninných řad.

Vztahy mezi měřenými uvolněnými deformacemi a hledanými nehomogenními zbytkovými napětími po hloubce mohou být při splnění základních předpokladů psány ve tvaru (viz [53]):

$$p(h) = \int_0^h 2I_A(H,h)P(H)dH \quad q(h) = \int_0^h 2I_B(H,h)Q(H)dH \quad t(h) = \int_0^h 2I_B(H,h)T(H)dH \qquad (6)$$

V disertační práci jsou příčinkové funkce I_A a I_B určeny ve tvaru polynomické funkce dvou proměnných (hloubka napětí, hloubka otvoru) s koefcienty α_{kl} a β_{kl} a jsou použity pro určení nehomogenní zbytkové napjatosti po hloubce.

5.2.1 Použití příčinkové funkce – integrální metoda

Při aplikaci příčinkové funkce na integrální metodu je možno jednoduše stanovit zbytková napětí v libovolných hloubkách tělesa, ne jen v těch hloubkách, pro které jsou určeny kalibrační koeficienty integrální metody nebo pro ty přírůstky hloubky otvoru, ve kterých bylo provedeno odvrtávání. Vztah mezi uvolněnými deformacemi a zbytkovými napětími může být psán ve tvaru:

$$\mathbf{p}_{I,1} = -\frac{1+\mu}{E}\mathbf{G}^{\alpha}_{I,J}\cdot\mathbf{P}_{J,1} \quad \mathbf{q}_{I,1} = -\frac{1}{E}\mathbf{G}^{\beta}_{I,J}\cdot\mathbf{Q}_{J,1} \quad \mathbf{t}_{I,1} = -\frac{1}{E}\mathbf{G}^{\beta}_{I,J}\cdot\mathbf{T}_{J,1} \qquad (7)$$

přičemž platí, že:

když $h_i \ge H_j$ potom: $g^{\alpha}_{ij} = \sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{m}\frac{\alpha_{kl}}{k}h_i^{l-1}\left(H_j^k - H_{j-1}^k\right)$

když $h_i < H_j$ potom: když $h_i > H_{j-1}$ potom: $g^{\alpha}_{ij} = \sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{m}\frac{\alpha_{kl}}{k}h_i^{l-1}\left(h_i^k - H_{j-1}^k\right)$

když $h_i \le H_{j-1}$ potom: $g^{\alpha}_{ij} = 0$

5.2.2 Použití příčinkové funkce – metoda mocninných řad

Pro metodu mocninných řad platí, že zbytková napětí v závislosti na hloubce otvoru aproximujeme polynomem (R-1)-tého řádu. Potom vztah mezi uvolněnými deformacemi a zbytkovými napětími může být psán ve tvaru:

$$\mathbf{p}_{I,1} = -\frac{1+\mu}{E}\mathbf{G}^{\alpha}_{I,R}\cdot\mathbf{P}_{R,1} \quad \mathbf{q}_{I,1} = -\frac{1}{E}\mathbf{G}^{\beta}_{I,R}\cdot\mathbf{Q}_{R,1} \quad \mathbf{t}_{I,1} = -\frac{1}{E}\mathbf{G}^{\beta}_{I,R}\cdot\mathbf{T}_{R,1} \qquad (8)$$

kde:

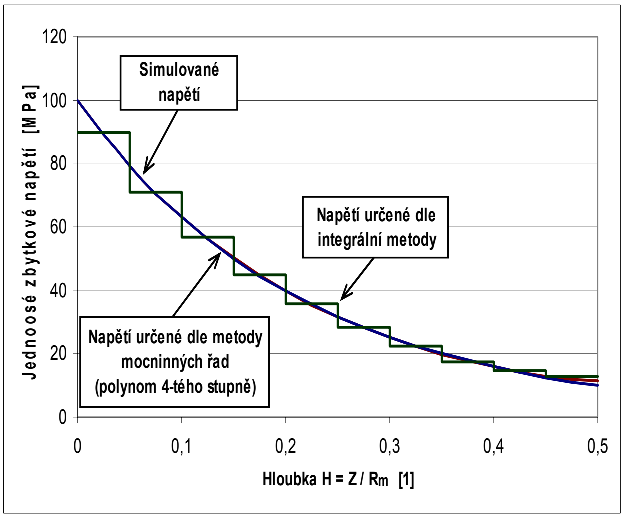
$$g_{ir} = \sum_{k=1}^{n} \sum_{l=1}^{m} \frac{\alpha_{kl}}{r+k-1} h_i^{r+k+l-2} \quad (9)$$

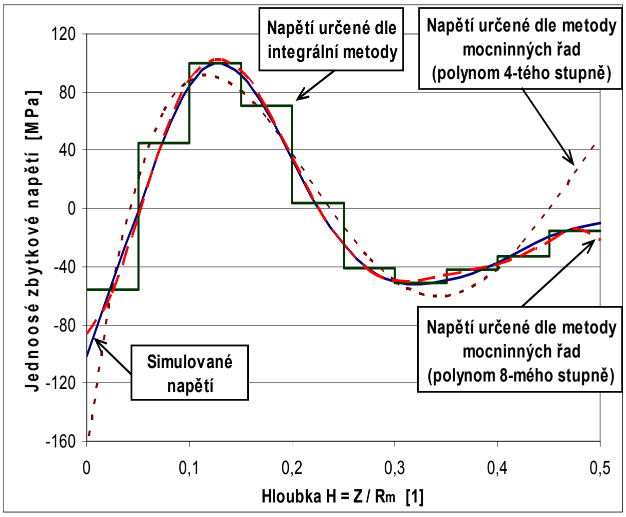
Vzhledem k tomu, že počet neznámých přírůstků hloubek J ($1 \leq j \leq J$), na kterých působí zbytková napětí, resp. počet neznámých koeficientů R ($1 \leq r \leq R$) v polynomu je obvykle menší než počet přírůstků hloubek otvoru I ($1 \leq i \leq I$), získáváme přeurčený systém s I rovnic o J, resp. R neznámých, na jehož řešení je možno použít metodu nejmenších čtverců.

5.2.3 Stanovení zbytkového napětí pomocí příčinkové funkce

Pomocí metody konečných prvků s využitím geometricky osově symetrického modelu osově nesymetricky zatěžovaného (kap. 4) bylo simulováno několik případů nehomogenní zbytkové napjatosti po hloubce a byla stanovena odezva tenzometrické růžice RY 61 S při postupném odvrtávání. Zbytková napětí byla vypočtena pomocí integrální metody a metody mocninných řad, které byly odvozeny na základě koeficientů příčinkové funkce definované výše.

Z níže uvedených grafů lze vidět, že vypočtená zbytková napětí jak integrální metodou, tak i metodou mocninných řad, velmi přesně vystihují simulovaná napětí. Pro dostatečně výstižný popis nehomogenní napjatosti, která je výrazně nehomogenní po hloubce tělesa, je nutné použít pro metodu mocninných řad aproximační polynom vyššího stupně nebo při použití integrální metody více přírůstků hloubek napětí. Ovšem v takovémto případě, zejména při reálném měření, může dojít ke zvýšenému projevu numerické chyby. Dosažené výsledky ukazují, že použití příčinkové funkce je velmi výhodné k výpočtu zbytkového napětí zejména z důvodu její snadné aplikace s nastavitelnými parametry (snadno nastavitelný počet přírůstků hloubek, na kterých působí zbytková napětí, resp. stupeň aproximačního polynomu). Použití příčinkové funkce je vhodné i z důvodu přesnosti vypočtených zbytkových napětí i z důvodu možného rozvoje směrem k nalezení vhodnější aproximace nehomogenních zbytkových napětí po hloubce.





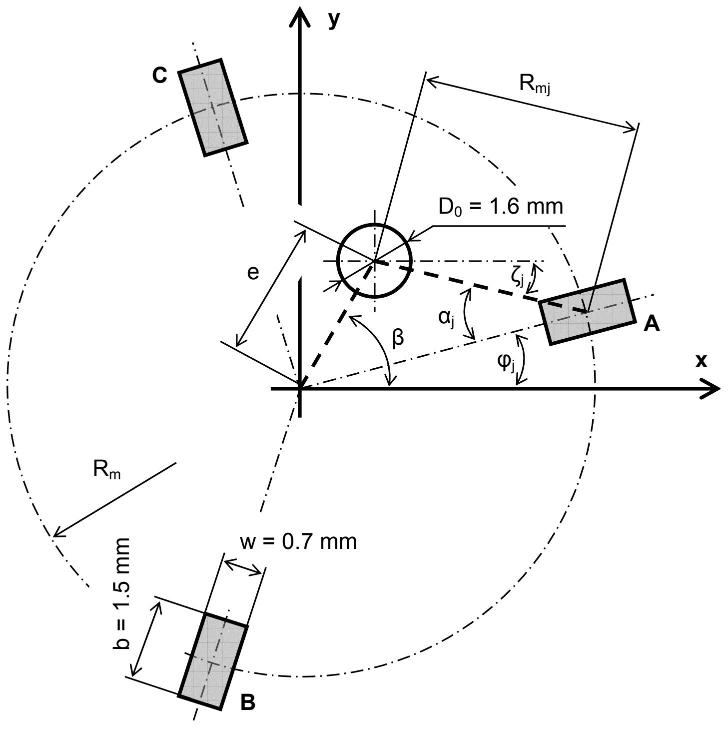
Obr. 6 Simulovaná zbytková napětí a vypočtená užitím příčinkové funkce

6 RESPEKTOVÁNÍ EXCENTRICITY VRTANÉHO OTVORU VZHLEDEM KE STŘEDU TENZOMETRICKÉ RŮŽICE

Vrtaný otvor by měl být vyvrtán ve středu tenzometrické růžice. Pro případ, kdy je otvor vyvrtán s podstatnou excentricitou, je nutno použít vztahů (metodu), které zohledňují tuto excentricitu. Dle rešeršní studie se jeví jako nejvhodnější metoda, kterou uvedl Vangi [29], která popisuje vztah mezi uvolněnými deformacemi a zbytkovými napětími i pro případ excentrického otvoru a nehomogenní napjatosti po hloubce. Tento vztah může být psán ve tvaru:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_A \\ \boldsymbol{\varepsilon}_B \\ \boldsymbol{\varepsilon}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} \cdot \mathbf{a}_A^M \\ \mathbf{H} \cdot \mathbf{a}_B^M \\ \mathbf{H} \cdot \mathbf{a}_C^M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} \tag{10}$$

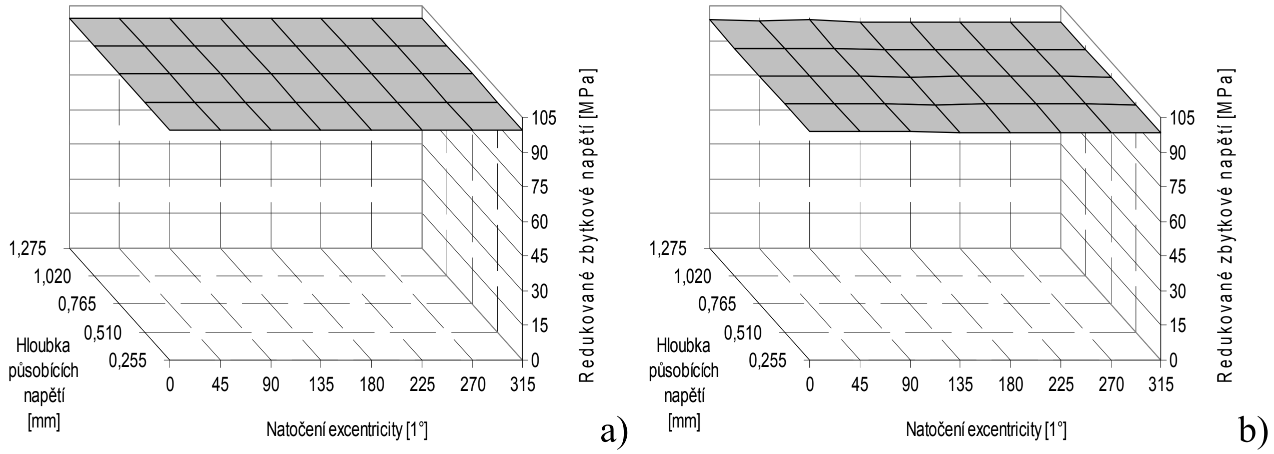
$\boldsymbol{\varepsilon}_j$ jsou uvolněné deformace, měřené jednotlivými tenzometry tenzometrické růžice, **H** je matice materiálových vlastností a $\mathbf{a}_j^M$ jsou transformované matice kalibračních koeficientů. **P**, **Q** a **T** jsou matice transformovaných zbytkových napětí.



Obr. 7 Tenzometrická růžice RY 61 S; excentrický otvor

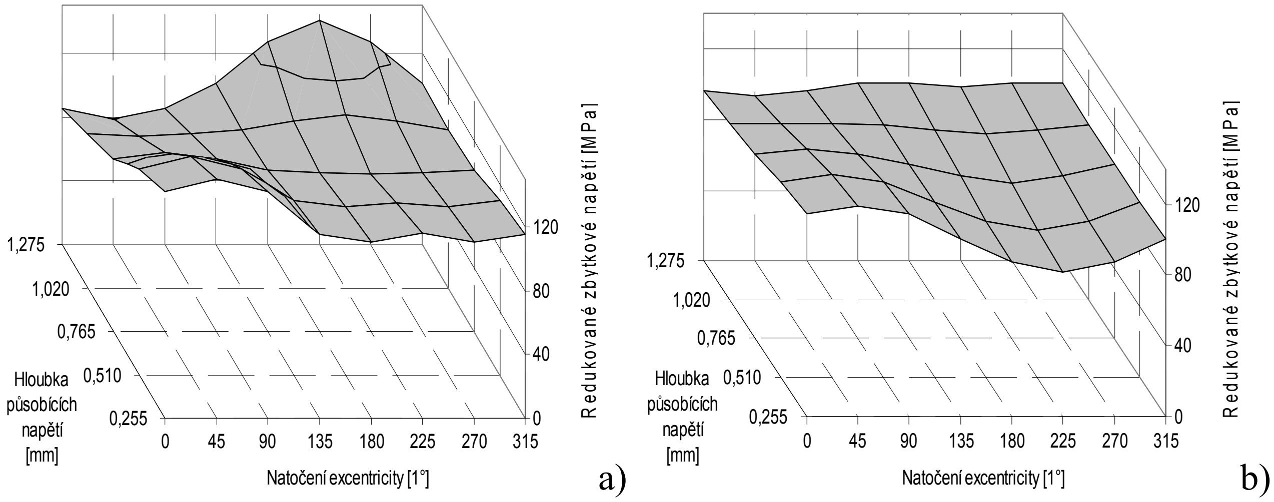
Pomocí metody konečných prvků bylo simulováno odvrtávání s excentricitou otvoru o velikosti 0,2 mm. Natočení této excentricity bylo voleno od 0 do 315° po 45°. Byla simulována rovinná rovnoměrná a smyková zbytková napjatost, homogenní po hloubce. Redukované napětí dle hypotézy max. τ bylo zvoleno pro oba případy o velikosti 100 MPa. Úhel mezi hlavním napětím σ_1 a tenzometrickou mřížkou A je nulový.

Na základě stanovených deformací jsou dle výše uvedeného vztahu (10) vypočtena zbytková napětí. Výsledky těchto napětí ve formě redukovaných napětí dle podmínky max. τ pro všechny zvažované případy jsou znázorněny na obr. 8.



Obr. 8 Určená redukovaná zbytková napětí pro a) rovnoměrnou a b) smykovou napjatost s respektováním excentricity otvoru

Na obr. 9 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 kap. 5.1.



Obr. 9 Určená redukovaná zbytková napětí pro a) rovnoměrnou a b) smykovou napjatost bez respektování excentricity otvoru

Maximální odchylka s uvažováním excentricity pro rovnoměrnou, resp. smykovou napjatost je 0,5 %, resp. 2,3 %. Maximální odchylka bez uvažování excentricity pro uvedené stavy zbytkových napětí je 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 [29] je tedy vhodná a nezbytná pro vyhodnocování zbytkových napětí odvrtávací metodou, když excentricita otvoru je podstatná.

7 ROZVOJ METODY VRTÁNÍ OTVORU DO OBLASTI PRUŽNĚ PLASTICKÝCH DEFORMACÍ POMOCÍ NEURONOVÝCH SÍTÍ

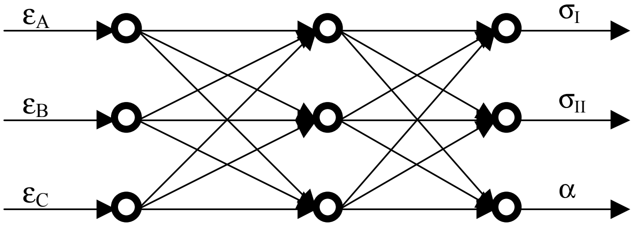
Podstatným omezením použití metody vrtání otvoru je měření zbytkových redukovaných napětí pouze přibližně do jedné poloviny napětí na mezi kluzu. Důvodem tohoto omezení je fakt, že vrtaný otvor působí koncentraci napětí v jeho okolí. Americká norma ASTM E-837-01 také uvádí, že redukované zbytkové napětí nesmí překročit jednu polovinu napětí na mezi kluzu.

Pro rozvoj odvrtávací metody do oblasti pružně plastických deformací v okolí vrtaného otvoru byla zvolena metoda, která spočívá v aproximaci velkého množství dat tvořených uvolněnými deformacemi a odpovídajícími zbytkovými napětími, které byly stanoveny metodou konečných prvků. K aproximaci takovéhoto velkého množství dat byla použita neuronová síť, která je pro tyto účely vhodná. Neuronová síť je vytvořena pomocí programu MATLAB verze 7.0.4.

7.1 NEURONOVÁ SÍŤ

Neuronová síť je soustava navenek jednoduchých prvků – neuronů, které jsou propojeny do sítě pomocí spojů – synapsí. Každý neuron koná „jednoduchou" matematickou funkci jedné reálné proměnné – aktivační funkce. Synapse přenášejí hodnoty aktivačních funkcí – signály – mezi jednotlivými neurony s určitou prostupností synapse – váhovým koeficientem. Vlastní neuron má prahový koeficient, který určuje práh propustnosti signálu neuronem.

Vhodným uspořádáním vhodného počtu neuronů získáme neuronovou síť, která může vykonávat jakoukoliv „složitou" matematickou spojitou funkci i více reálných proměnných. Takovýmto uspořádáním je např. úplná třívrstvá síť s dopředným šířením (feedforward neural network), naznačená na obr. 10, kde každý neuron následné vrstvy je spojen s každým neuronem vrstvy předešlé.



Obr. 10 Topologie neuronové sítě pro určování zbytkové napjatosti

Proces nalezení vhodných váhových a prahových koeficientů se nazývá trénování. Toto trénování probíhá pomocí tréninkové množiny, tj. sobě odpovídající množiny vstupních a výstupních vektorů. V našem případě vstupní vektor je tvořen změřenými uvolněnými deformacemi (ε_A, ε_B, ε_C) a výstupní vektor dvěma

hledanými zbytkovými napětími a úhlem jejich natočení (σ_I, σ_{II}, α). Pro vhodný popis systému – vztahu mezi měřenými deformacemi a hledanými zbytkovými napětími – musíme použít dostatečně výstižnou množinu dat vstupů a odpovídajících výstupů tak, aby byl dostatečně hustě pokryt celý stavový prostor.

7.2 TRÉNOVÁNÍ NEURONOVÝCH SÍTÍ

Při trénování budeme považovat za konstantní veličiny: průměr otvoru (D_0) 1,6 mm, typ a velikost tenzometrické růžice RY 61 S, materiálové charakteristiky homogenního izotropního materiálu s modulem pružnosti (E) 210 GPa a Poissonovým číslem (μ) 0,3. Tahová křivka tohoto materiálu je zvolena bilineární s mezí kluzu (R_e) 500 MPa a s proměnným tangenciálním modulem zpevnění v plastické oblasti (E_t). Koeficient plastického zpevnění $k = E_t/E$ je zvolen 0,01, 0,05 a 0,1. Předpokládáme průchozí otvor v tenké stěně a homogenní zbytkovou napjatost po hloubce tělesa i v rovinách rovnoběžných s povrchem. Pro každý koeficient plastického zpevnění bude vytvořena samostatná neuronová síť. To tedy znamená, že pro každou neuronovou síť jsou nezávisle proměnnými pouze naměřené deformace ve třech různých směrech.

K výpočtu tréninkové množiny byl použit 2D výpočtový model stěny – kap. 4. Pro různá zatížení byly určeny uvolněné deformace. Deformační zatížení byla volena tak, aby vypočtené uvolněné deformace ve směru hlavních napětí tvořily pole s rovnoměrným krokem 60 μm/m (pole s rovnoměrnými kroky těchto uvolněných deformací se při vlastním trénování ukázalo jako mnohem vhodnější než pole s rovnoměrnými kroky hlavních napětí). Hodnota maximálního zatížení byla volena tak, aby se redukované zbytkové napětí (redukované napětí v tělese bez otvoru) co nejvíce blížilo napětí na mezi kluzu. Deformace jsou určovány pro různá natočení – od 0 do 180 stupňů. Každá takto vytvořená tréninková množina pro zvolené koeficienty plastického zpevnění tvoří více než 2500 šestic (3 deformace; 2 napětí a úhel jejich natočení). Během trénování neuronové sítě se ukázalo, že je vhodné použít čtvrtý vstup, kterým je odhad úhlu α (natočení hlavních napětí), určený z uvolněných deformací podle vztahu (4), platného v lineární oblasti.

Postupným zvyšováním počtu neuronů ve skryté vrstvě a opakovaným trénováním byl určen vhodný počet neuronů skryté vrstvy – viz tab. 1. Vyšší počet těchto neuronů poskytl přesnější natrénování, ovšem chyba při simulaci testovací množinou (kap. 7.3) se výrazně zvyšovala. Výsledky trénování jednotlivých neuronových sítí uvádí tab. 1.

7.3 TESTOVÁNÍ NEURONOVÉ SÍTĚ

Pro ověření, zda takto vytvořená a natrénovaná neuronová síť má dostatečnou predikci, byly provedeny další výpočty se zatíženími, která vyvolala taková zbytková napětí, která nebyla obsažena v tréninkové množině. Zatížení byla volena

tak, aby uvolněné deformace ve směru os hlavních napětí byly v polovině intervalů uvolněných deformací pro trénování sítě (očekávána největší chyba). Určené deformace byly položeny na vstup sítě a byly porovnány výsledky výstupů sítě („změřené“ zbytkové napjatosti) s požadovanými výstupy (skutečné zbytkové napjatosti). Testovací množiny pro jednotlivé koeficienty plastického zpevnění obsahují okolo 2000 vektorů (vstupů a výstupů). Výsledky tohoto testování neuronové sítě uvádí tab. 1.

Lze vidět, že vypočtené hodnoty zbytkových napětí pomocí neuronových sítí jsou přesné a to jak pro známou – tréninkovou – množinu, tak i pro predikci – pro testovací množinu. Jen maximální procentuální odchylky některých hodnot jsou vyšší. Tyto vyšší maximální procentuální odchylky jsou ovšem pro případ nízkých hodnot zbytkových redukovaných napětí, u kterých se projeví i malá odchylka v absolutní hodnotě tohoto napětí. Proto tyto vyšší procentuální odchylky můžeme považovat za nepodstatné.

Každá tato neuronová síť je konstruována pouze pro jeden konkrétní materiál. Abychom mohli např. uvedené tři neuronové sítě použít pro libovolnou hodnotu koeficientu plastického zpevnění, je nutné tyto neuronové sítě spojit. Toto spojení může být uskutečněno opět pomocí neuronové sítě („nadsítě“), jak je provedeno v následující kapitole.

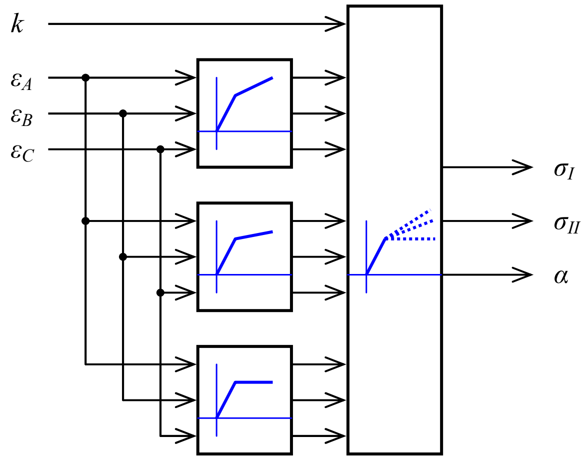
Odchylka		Neuronová síť s koeficientem plastického zpevnění		
		k = 0,1	k = 0,05	k = 0,01
		[MPa] (%)	[MPa] (%)	[MPa] (%)
maximální	trénování	18,4 **(7,6 %)**	18,5 **(6,8 %)**	23,8 **(11,4 %)**
	testování	22,8 **(6,8 %)**	21,0 **(9,8 %)**	28,1 **(19,9 %)**
střední hodnota	trénování	1,7 **(0,6 %)**	2,1 **(0,7 %)**	2,7 **(0,9 %)**
	testování	1,8 **(0,6 %)**	2,2 **(0,7 %)**	2,9 **(1,0 %)**
99% kvantil	trénování	6,8 **(3,4 %)**	7,2 **(3,6 %)**	11,7 **(5,6 %)**
	testování	8,4 **(3,6 %)**	8,5 **(3,7 %)**	12,9 **(5,5 %)**
Počet neuronů skryté vrstvy		40	50	60

Tab. 1 Odchylky redukovaných napětí na výstupu jednotlivých neuronových sítí od požadovaných napětí pro trénování a testování

7.4 SPOJOVÁNÍ NEURONOVÝCH SÍTÍ

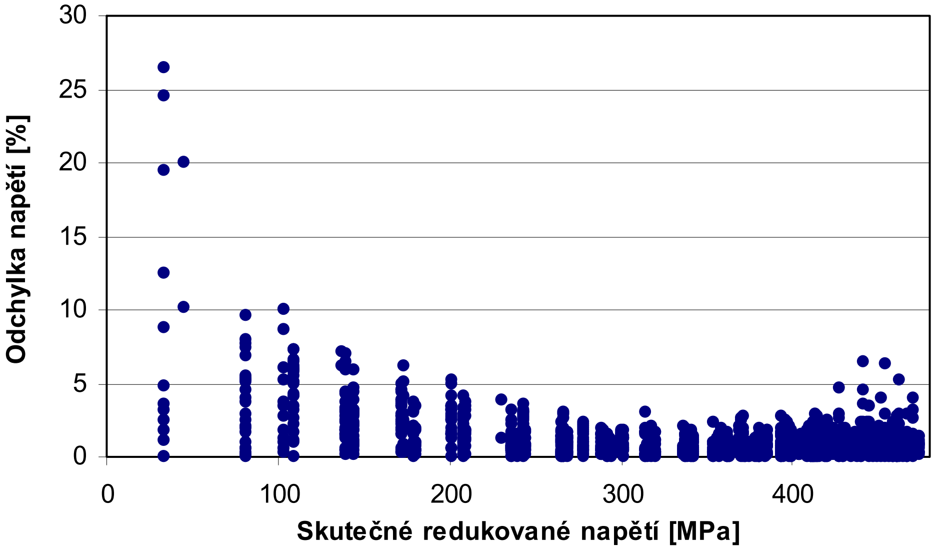
Pro zobecnění navržených neuronových sítí pro jednotlivé koeficienty plastického zpevnění byla vytvořena neuronová síť, která slučuje předešlé sítě a umožňuje zadání téměř jakéhokoliv koeficientu plastického zpevnění. Tato neuronová síť je potom tvořena vstupy tvořenými výstupy jednotlivých navržených sítí a vstupem

koeficientu plastického zpevnění. Výstupy jsou pak hledaná hlavní zbytková napětí a úhel jejich natočení. Ve skryté vrstvě této neuronové sítě stačilo použít 7 neuronů. Ke trénování byly použity všechny tři tréninkové množiny předchozích neuronových sítí. Tato neuronová síť je zobrazena na obr. 11.



Obr. 11 Slučující neuronová síť jednotlivé sítě pro nastavení libovolného koeficientu plastického zpevnění

Pro ověření správné funkce této sítě byla spočtena testovací množina s koeficientem plastického zpevnění 0,025 a s takovými uvolněnými deformacemi, na které tato neuronová síť nebyla trénována. Odchylky požadovaných redukovaných napětí od napětí na výstupu neuronové sítě uvádí tab. 2 pro tréninkové i testovací množiny s různými koeficienty plastického zpevnění. Na obr. 12 je znázorněno rozložení všech těchto odchylek v % v závislosti na hodnotě redukovaného napětí pro tuto spojující síť pro testovací množinu určenou pro koeficient plastického zpevnění 0,025.



Obr. 12 Odchylky požadovaného napětí od napětí na výstupu slučující neuronové sítě v hodnotách redukovaného napětí pro testovací množinu pro $k = 0{,}025$ v %

Odchylka		Vstupní koeficient plastického zpevnění do slučující neuronové sítě			
		k = 0,1	k = 0,05	k = 0,01	k = 0,025
		[MPa] (%)	[MPa] (%)	[MPa] (%)	[MPa] (%)
maxi-mální	trénování	18,8 **(9,1 %)**	19,5 **(8,2 %)**	26,7 **(12,0 %)**	–
	testování	27,9 **(8,4 %)**	26,6 **(12,9 %)**	25,8 **(13,1 %)**	28,7 **(26,4 %)**
střední hodnota	trénování	2,3 **(0,8 %)**	2,7 **(0,8 %)**	3,0 **(1,0 %)**	–
	testování	2,5 **(0,8 %)**	3,4 **(1,1 %)**	3,1 **(1,0 %)**	3,2 **(1,1 %)**
99% kvantil	trénování	9,2 **(3,9 %)**	10,5 **(4,2 %)**	11,1 **(5,3 %)**	–
	testování	11,9 **(3,4 %)**	11,2 **(5,8 %)**	13,3 **(4,9 %)**	11,0 **(6,4 %)**

Tab. 2 Odchylky redukovaných napětí na výstupu slučující neuronové sítě od požadovaných napětí pro trénování a testování pro různé hodnoty koeficientu plastického zpevnění

Tímto způsobem spojování neuronových sítí bychom mohli pokračovat dále – mohli bychom například vytvořit síť spojující neuronové sítě vytvořené pro různé hodnoty napětí na mezi kluzu. Takovýmto způsobem bychom mohli vytvořit spojení neuronových sítí pro „libovolný“ materiál, příp. další vstupní parametry.

Z uvedených výsledků lze vidět, že odchylky napětí, určených neuronovou sítí, od požadovaných napětí jsou přijatelné pro praxi a neuronová síť otevírá nový směr rozvoje metody vrtání otvoru do oblasti pružně plastických deformací a tím umožňuje měření vyšších hodnot zbytkových napětí než doposud bylo možné. Navíc vyhodnocení zbytkových napětí neuronovou sítí je velmi rychlé (téměř „okamžité“). Negativní skutečností je, že výpočet jedné tréninkové množiny pomocí metody konečných prvků je velmi časově náročný (dny) a středně časově náročné je i vlastní trénování sítě (hodiny).

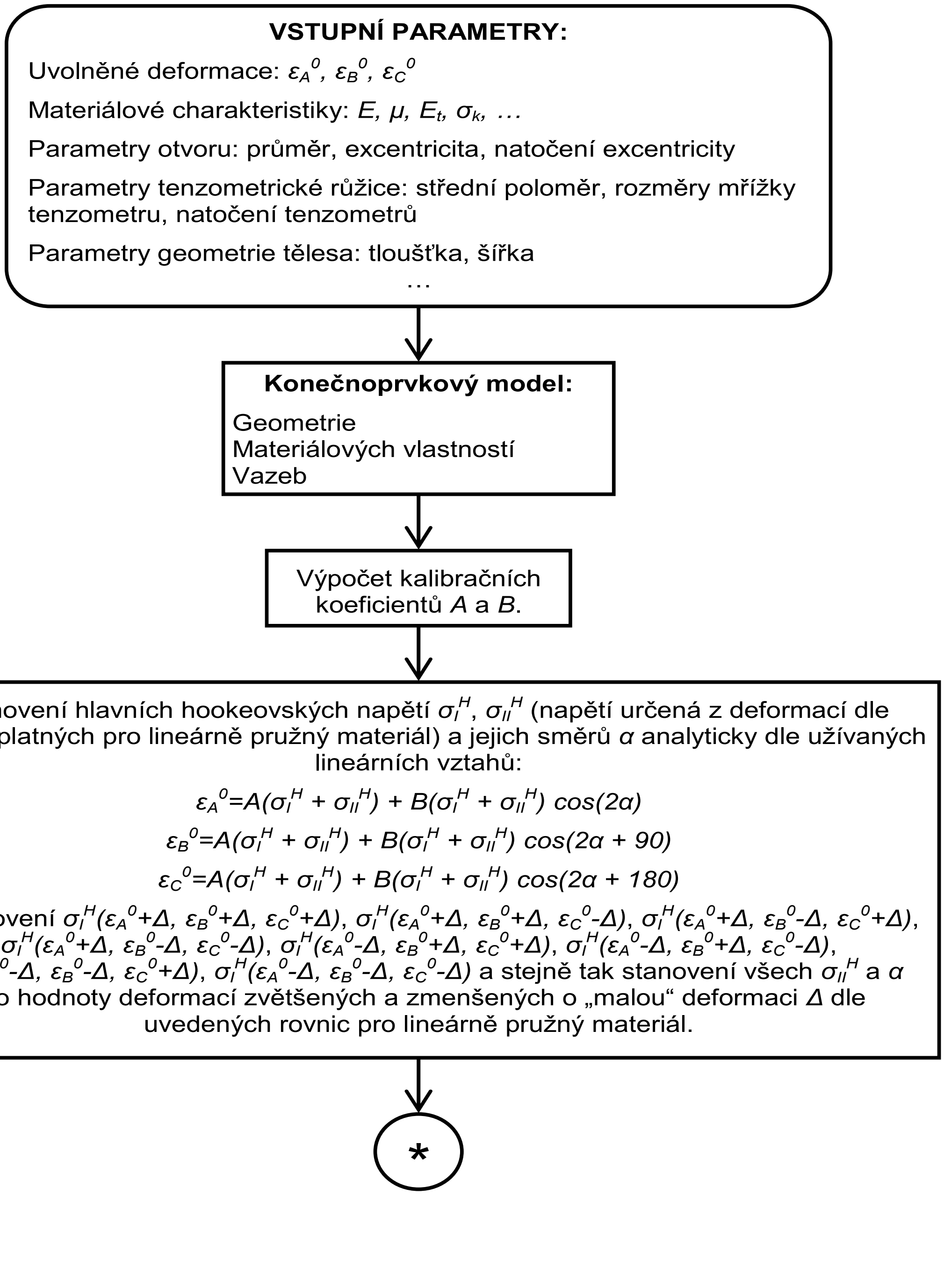
8 ROZVOJ METODY VRTÁNÍ OTVORU DO OBLASTI PRUŽNĚ PLASTICKÝCH DEFORMACÍ POMOCÍ ITERAČNÍHO ŘEŠENÍ METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ

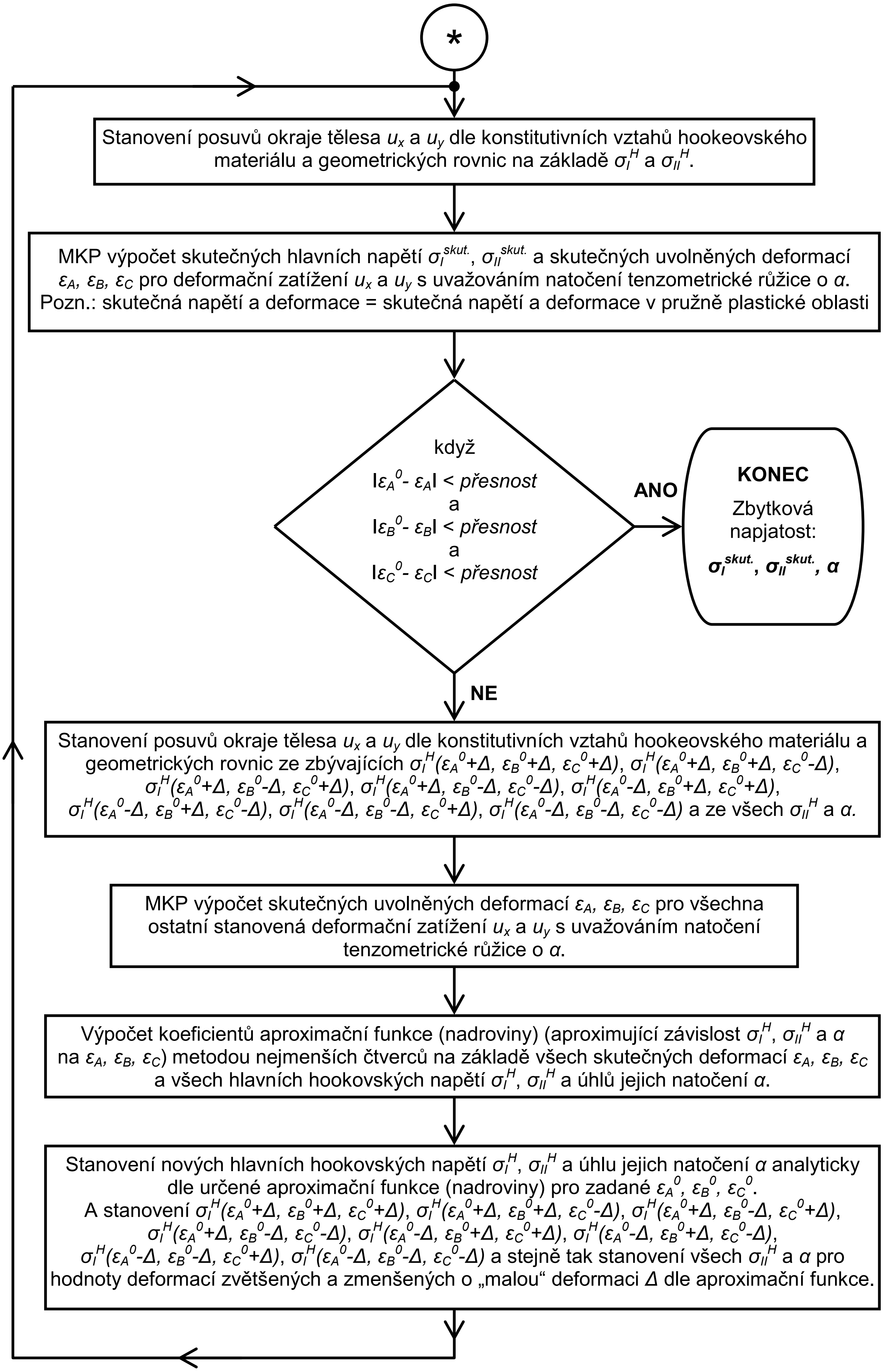
Tato kapitola pojednává o zcela odlišném způsobu vyhodnocování zbytkové napjatosti, nejen v pružně plastické oblasti, než bylo uvedeno v předchozím textu. Zde bylo využito iteračního řešení pomocí metody konečných prvků. Toto iterační řešení přináší mnoho výhod (nastavení libovolných hodnot vstupních parametrů; není třeba předvýpočet kalibračních koeficientů, resp. tréninkové množiny), ale i některé nevýhody (delší výpočetní čas – 2D úloha (viz obr. 3): minuty, 3D úloha (viz obr. 2): hodiny; potřebnost programu, umožňujícího konečnoprvkový výpočet – Ansys).

Libovolnými nastavitelnými vstupními parametry ve vytvořeném iteračním programu mohou být nejen změřené uvolněné deformace, ale i průměr vrtaného otvoru, hloubka otvoru, rozměry tenzometrické růžice, excentricita otvoru vzhledem ke středu tenzometrické růžice, rozměry tělesa, materiálové charakteristiky apod. (viz např. tab. 3). Po zadání těchto hodnot samočinně dojde k vytvoření konečnoprvkového modelu a k výpočtu zbytkových napjatostí.

8.1 PODSTATA ITERAČNÍHO ŘEŠENÍ ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI

Navržené iterační řešení, umožňující výpočet homogenní zbytkové napjatosti po hloubce, může být popsáno pomocí vývojového diagramu – obr. 13. Uvedený postup výpočtu byl přepsán pomocí programovacího jazyka, který používá program Ansys. Vzniklý program byl potom použit k ověření správné funkce uvedeného algoritmu.





Obr. 13 Vývojový diagram iteračního výpočtu zbytkových napětí pomocí MKP

Velikost parametru Δ, který vystupuje v tomto iteračním řešení, je vhodné volit tak, aby byl stejný nebo menší než zvolená odchylka mezi požadovanou a výslednou uvolněnou deformací.

8.2 VÝPOČET ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI ITERAČNÍM ŘEŠENÍM – PRŮCHOZÍ OTVOR VE STĚNĚ

Pro ověření výše uvedeného iteračního řešení bylo metodou konečných prvků (obr. 3) simulováno několik případů zbytkové napjatosti, v tomto případě homogenní po hloubce v tenké stěně (vrtán průchozí otvor). Vstupní parametry modelu uvádí tab. 3. Velikosti simulovaných redukovaných zbytkových napětí byly rovny napětí na mezi kluzu.

V tab. 4 jsou uvedeny zbytkové napjatosti simulované, vypočtené dle navrženého iteračního řešení a dle vztahů platných pro lineárně pružný materiál (viz kap. 6). Je vidět, že při takto vysokých zbytkových redukovaných napětích (odpovídající napětím na mezi kluzu) dochází při užití používaných vztahů pro lineárně pružný materiál k velmi vysokým chybám stanovené zbytkové napjatosti. Oproti tomu uvedené iterační řešení poskytuje velmi přesné výsledky. Přesnost tohoto iteračního řešení lze ještě zvýšit nastavením nižší hodnoty přesnosti použité při iteraci.

Veličina		**Jednotka**	**Velikost**		
Uvolněné deformace (ε_A, ε_B, ε_C) naměřené tenzometry pro napjatost:	rovnoměrnou	[μm/m]	–496	–533	–588
	smykovou		–108	464	128
	jednoosou		–525	357	–287
Modul pružnosti		[GPa]	210		
Poissonovo číslo		[1]	0,3		
Mez kluzu		[MPa]	500		
Tangenciální modul (materiál s bilineární tahovou křivkou)		[GPa]	2,1		
Průměr otvoru		[mm]	1,6		
Excentricita otvoru		[mm]	0,2		
Natočení excentricity		[1°]	135		
Střední poloměr tenzometrické růžice		[mm]	2,55		
Úhly mezi tenzometry tenzometrické růžice (měřeno proti směru chodu hodinových ručiček)		[1°]	135		
Šířka tenzometrů		[mm]	0,7		
Délka tenzometrů		[mm]	1,5		
½ šířky modelu		[mm]	80		

Tab. 3 Vstupní parametry pro výpočet zbytkových napjatostí

Napjatost			Simulované (pravé) hodnoty	Hodnoty stanovené iteračním řešením (% odchylky od skutečných hodnot)		Hodnoty stanovené dle lineárních vztahů (% odchylky od skutečných hodnot)	
Rovno-měrná	σ_I	[MPa]	500	505	(**1 %**)	840	(**68 %**)
	σ_{II}	[MPa]	500	506	(**1 %**)	819	(**64 %**)
Smyková	σ_I	[MPa]	250	248	(**1 %**)	281	(**12 %**)
	σ_{II}	[MPa]	–250	–250	(**0 %**)	–267	(**7 %**)
	α	[1°]	45	45	(**0 %**)	41	(**9 %**)
Jednoosá	σ_I	[MPa]	500	506	(**1 %**)	1108	(**122 %**)
	σ_{II}	[MPa]	0	–5	(–)	197	(–)
	α	[1°]	45	45	(**0 %**)	42	(**7 %**)

Tab. 4 Vypočtené hodnoty zbytkových napětí – průchozí otvor v tenké stěně

8.3 VÝPOČET ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI ITERAČNÍM ŘEŠENÍM – NEPRŮCHOZÍ OTVOR V MASIVNÍM TĚLESE

Pomocí konečnoprvkového modelu (obr. 2) bylo opět simulováno několik typů zbytkové napjatosti, homogenní po hloubce, v masivním tělese s neprůchozím otvorem o hloubce 1,2 mm. Vstupní parametry pro výpočet zbytkové napjatosti jsou obdobné jako pro otvor průchozí v tenké stěně – viz tab. 3. V tab. 5 jsou uvedeny zbytkové napjatosti simulované, vypočtené dle navrženého iteračního řešení a dle vztahů platných pro lineárně pružný materiál (viz kap. 6).

Napjatost			Simulované (pravé) hodnoty	Hodnoty stanovené iteračním řešením (% odchylky od skutečných hodnot)		Hodnoty stanovené dle lineárních vztahů (% odchylky od skutečných hodnot)	
Rovno-měrná	σ_I	[MPa]	500	506	(**1 %**)	649	(**30 %**)
	σ_{II}	[MPa]	500	496	(**–1 %**)	636	(**27 %**)
Smyková	σ_I	[MPa]	250	247	(**–1 %**)	256	(**2 %**)
	σ_{II}	[MPa]	–250	–251	(**0 %**)	–257	(**3 %**)
	α	[1°]	45	45	(**0 %**)	44	(**2 %**)
Jednoosá	σ_I	[MPa]	500	505	(**1 %**)	846	(**69 %**)
	σ_{II}	[MPa]	0	–1	(–)	–3,4	(–)
	α	[1°]	45	45	(**0 %**)	46	(**2 %**)

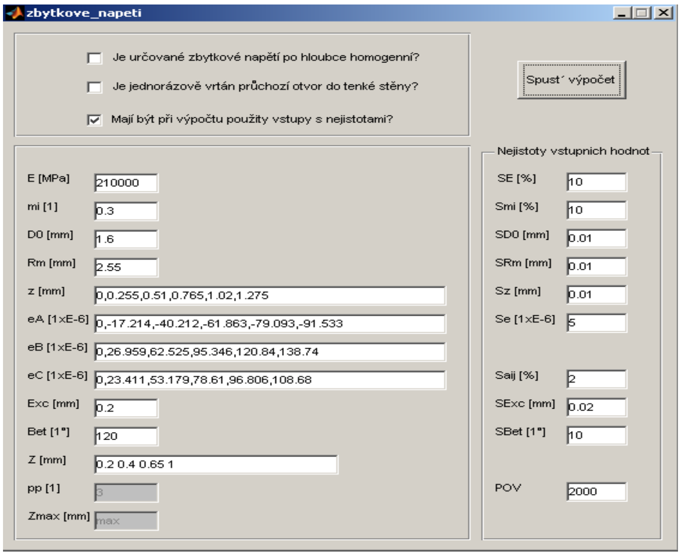
Tab. 5 Vypočtené hodnoty zbytkových napětí – neprůchozí otvor v masivním tělese

Navržené iterační řešení je pro svoji variabilitu vstupů, rozvoj metody vrtání otvoru pro pružně plastické deformace a přesnost, velmi vhodné. Toto iterační řešení umožňuje výpočet zbytkové napjatosti pro hodnoty redukovaných zbytkových napětí i vysoko nad napětím na mezi kluzu. Přesnost vypočtených napětí potom záleží jen na přesnosti vstupních parametrů a na přesnosti nastavení iteračního řešení. Konvergence výpočtu je rychlá a tím poskytuje výsledky v přijatelném čase.

9 STANOVENÍ NEJISTOT VYPOČTENÉ ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI A JEJÍ CITLIVOSTI NA VSTUPNÍCH PARAMETRECH

V předchozím textu byla zbytková napjatost určována vždy na základě „přesných" vstupních parametrů – bez nejistot. Velké hodnoty nejistot některých vstupních parametrů však mohou výsledky vypočtené napjatosti zcela znehodnotit. Tato kapitola je zaměřena na určení citlivostí vypočtené zbytkové napjatosti metodou vrtání otvoru na jednotlivých vstupních parametrech. Na základě těchto citlivostí jsme schopni určit, které nejistoty vstupních parametrů mají podstatný vliv na vyhodnocování. Dále jsou vyhodnocena zbytková napětí a jejich nejistoty pro několik případů. Ke stanovení citlivostí a nejistot zbytkových napjatostí bylo opět využito numerických simulací pomocí konečnoprvkového modelu (obr. 4).

Nejistoty vstupních parametrů jsou zohledněny při výpočtu zbytkové napjatosti pomocí metody Monte Carlo. Náhodně jsou voleny vstupy, u kterých se předpokládá Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti s předem zvolenou směrodatnou odchylkou (nejistotou). Na základě opakovaného výpočtu pro různé náhodné vstupy jsou potom stanoveny zbytkové napjatosti, které jsou dále statisticky zpracovány.



Obr. 14 Program pro výpočet zbytkové napjatosti

Pro výpočet zbytkových napětí a jejich nejistot byl vytvořen program (obr. 14). Tento program umožňuje zadání všech vstupních parametrů a jejich nejistot.

Umožňuje stanovit zbytková napětí homogenní (dle normy ASTM) i nehomogenní (dle integrální metody) po hloubce tělesa; s průchozím a neprůchozím otvorem; s excentricitou otvoru a bez. Po spuštění programu dojde k výpočtu zbytkových napjatostí, k jejich statistickému zpracování a ke grafickému znázornění výsledků.

9.1 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

Pro zjištění vlivu změny jednotlivých vstupních parametrů na vyhodnocované zbytkové napjatosti byla provedena citlivostní analýza. Postupně byl vždy jeden vstupní parametr náhodně volen dle Gaussova rozložení s příslušnou směrodatnou odchylkou. Ostatní parametry byly konstantní (s nulovou nejistotou). Opakovaným výpočtem redukovaných zbytkových napětí byla stanovena citlivost.

Určené citlivosti (viz plná verze disertační práce) nám vyjadřují podíl variačního koeficientu stanoveného zbytkového redukovaného napětí k variačnímu koeficientu příslušného vstupního parametru, tj. vyjadřují míru citlivosti zbytkového redukovaného napětí na jednotlivých vstupních parametrech. Z výsledků plyne, že pro předpoklad nehomogenních napětí po hloubce, je citlivost pro hloubku otvoru, změřené deformace a kalibrační koeficienty velmi vysoká (i okolo 10). Tyto citlivosti jsou navíc závislé na hloubce otvoru – s rostoucí hloubkou otvoru rostou – což způsobuje vyšší nejistoty vypočtených napjatostí v hloubkách odlehlých od povrchu tělesa. Naproti tomu citlivost pro Poissonovo číslo a velikost excentricity otvoru je téměř nulová. Tzn., že procentuelní změna např. excentricity vyvolá malé procentuelní změny vypočtené napjatosti. Nicméně pokud bychom tuto excentricitu nezahrnuli do výpočtu – její změna by byla 100 % – chyby ve vypočtené napjatosti by byly velmi podstatné. Z toho důvodu je respektování excentricity, tak jak je provedeno v této práci, velmi důležité. Citlivost pro průměr otvoru a modul pružnosti je přibližně rovna jedné.

Pro předpoklad homogenní napjatosti po hloubce je citlivost vypočtených napjatostí na vstupních veličinách výrazně menší a s hloubkou téměř konstantní. Pokud tedy můžeme považovat napjatost po hloubce za homogenní, jsou nejistoty této napjatosti výrazně nižší než pro napjatost nehomogenní. Přibližně stejné jsou i citlivosti pro případ průchozího otvoru v tenké stěně.

9.2 NEJISTOTY ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI

Pro několik případů byl proveden opakovaný výpočet zbytkových napětí s uvažováním nejistot všech vstupních parametrů současně (viz plná verze disertační práce). Vypočtené napjatosti pak byly statisticky zpracovány a byly určeny nejistoty. Z výsledků plyne, že při předpokladu nehomogenní napjatosti po hloubce bychom sice byli schopni postihnout nehomogenní napětí po hloubce, ovšem s výraznou nejistotou, která významně roste se zvětšující se hloubkou otvoru. Tato skutečnost plyne již z provedené citlivostní analýzy. Velikosti nejistot mohou dosáhnout

i nominálních hodnot. Použití předpokladu homogenního napětí po hloubce přináší přijatelné nejistoty, ovšem tento předpoklad významně omezuje použití této metody.

Lze tedy říci, že pokud je to možné, je lépe vždy použít předpoklad homogenní napjatosti po hloubce. Pro předpoklad nehomogenní napjatosti po hloubce mohou být získané nejistoty vysoké a pro „velké“ hloubky pod povrchem (větší jak 0,3 až 0,4 násobek středního poloměru tenzometrické růžice) při použití „velkého“ počtu přírůstků hloubek, na kterých působí zbytková napětí (více jak 3 až 4), nám výsledky znehodnocují. V takovémto případě je nutné dbát, aby především nejistoty změřené hloubky otvoru, změřených uvolněných deformací a použitých kalibračních koeficientů byly co nejmenší.

10 ZÁVĚR

Jak již bylo řečeno v úvodu, znalost zbytkových napětí je velmi důležitá. Metoda vrtání otvoru je v praxi nejpoužívanější, proto její rozvoj je velmi významný. Tento rozvoj spočívá v odstraňování předpokladů, které omezují její použitelnost a také v zajištění vhodných faktorů, které umožňují zvyšování přesnosti této metody. Z rešeršní studie jsou stanovena podstatná omezení metody vrtání otvoru a oblasti jejího možného rozvoje. Jsou stanoveny cíle disertační práce, kterých je dosaženo s využitím numerických simulací pomocí metody konečných prvků.

10.1 DOSAŽENÉ CÍLE PRÁCE

Z velkého množství výpočetních metod, publikovaných mnoha autory pro měření nehomogenní zbytkové napjatosti po hloubce a pro případ excentrického otvoru vzhledem ke středu tenzometrické růžice, byly vybrány ty nejvhodnější. Vhodnou metodou pro měření nehomogenní zbytkové napjatosti po hloubce je integrální metoda (kap. 5.1). Za nejvhodnější nalezenou obecnou metodu pro měření těchto nehomogenních napjatostí lze považovat metodu využívající příčinkové funkce (kap. 5.2). V uvedených kapitolách byl proveden popis těchto metod, jejich teoretická podstata a ověření jejich správnosti a přesnosti. Ze závěrů plyne, že tyto použité metody jsou skutečně nejvhodnější z důvodu přesnosti a výstižnosti nehomogenity zbytkové napjatosti po hloubce. Dále byla určena velmi vhodná metoda pro měření zbytkové napjatosti i s excentrickým otvorem vzhledem ke středu tenzometrické růžice i s nehomogenní napjatostí po hloubce (kap. 6). A také byla ověřena její správnost a přesnost.

Pro rozvoj odvrtávací metody do oblasti pružně plastických deformací byly navrženy dva vlastní přístupy. První přístup je založený na aproximaci dostatečně velké množiny zbytkových napjatostí a odpovídajících uvolněných deformací pomocí neuronové sítě (kap. 7). Druhý přístup je založený na iteračním řešení zbytkové napjatosti pomocí metody konečných prvků (kap. 8). Tento druhý přístup je mnohem více komplexnější, neboť umožňuje zadat „libovolné“ hodnoty „všech“

vstupních parametrů, vyskytující se při řešení zbytkové napjatosti metodou vrtání otvoru. Oba přístupy byly popsány a také byla ověřena jejich správnost a přesnost.

V práci také byla provedena analýza nejistot při výpočtu zbytkové napjatosti odvrtávací metodou, která je nezbytná při používání v praxi (kap. 9). Z této analýzy vyplývá, které vstupní ovlivňující parametry mají podstatný vliv na vypočtená zbytková napětí a musíme u nich dbát, aby jejich nejistoty byly co možná nejmenší.

Vytýčených cílů se podařilo dosáhnout v plném rozsahu s velmi dobrými výsledky.

10.2 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Přínosem této práce pro vědu je rozvoj metody vrtání otvoru do dalších oblastí, které dříve omezovaly její použitelnost. Teoreticky byly rozebrány navržené i nalezené vhodné výpočtové metody pro různé problémy při stanovení zbytkové napjatosti odvrtáváním. I těmito rozbory byla zdůvodněna vhodnost použitých metod.

Dále byla ověřena použitelnost těchto nalezených, resp. navržených vhodných výpočtových metod pomocí numerických simulací. Byla určena jejich přesnost a to i pro případ s nejistými vstupy. Mimo jiné byla analyzována možnost použití kalibračních koeficientů z normy ASTM pro tenzometrickou růžici RY 61 S a vliv konečných rozměrů tělesa na výpočet zbytkové napjatosti (viz plná verze disertační práce). Dále bylo vyšetřeno použití ASTM, použitelné pro homogenní napjatost po hloubce, pro výpočet nehomogenní napjatosti (viz plná verze disertační práce).

Z uvedených důvodů je přínos této práce jak pro vědu (rozvoj, teoretický rozbor), tak pro praxi (ověření použitelnosti uvedených metod, určení jejich přesnosti) značný. Touto prací a dalšími publikacemi autora [36] až [56] je metoda vrtání otvoru posouvána opět o podstatnou část dále.

LITERATURA

[1] ASTM Designation E-837-01. *ASTM Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gauge* Method. United States, 2001.

[2] BARLÉ, J. – GRUBIŠIC, V. On the Reliability of Residual Stresses Determined using the Hole Drilling Metod. *17th Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics*. Prague, 2000. pp. 23-24.

[3] BEGHINI, M. – BERTINI, L. – RAFFAELLI, P. Numerical Analysis of the Plasticity Effects in the Hole Drilling Residual Stress Measurement. *ASTM – Journal for Testing and Evaluation.* Vol. 22., No. 6. 1994. pp. 522-529.

[4] BEGHINI, M. – BERTINI, L. Recent Advances in the Hole Drilling Method for Residual Stress Measurement. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. 7, No. 2. April 1998. pp. 163-172.

[5] BEGHINI, M. – BERTINI, L. Analytical Expressions of the Influence Functions for Accuracy and Versatility Improvement in the Hole-Drilling Method. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. Vol. 35, No. 2. March 2000. pp. 125-135.

[6] BERT, C. W. – THOMPSON, G. L. A Method for Measuring Planar Residual Stresses in Rectangularly Orthotropic Materials. J. Composite Mat. 2. No. 4. 1968. pp. 244-253.

[7] BIJAK-ZOCHOWSKI, M. A Semi-destructive Method of Measuring Residual Stresses. *VDI-Berichte.* Vol. 313. 1978. pp. 469-476.

[8] BUSH, A. J. – KROMER, F. J. Simplification of the Hole-Drilling Method of Residual Stress Measurements. *ISA Trans. 12*. No. 3. 1973. pp. 249-259.

[9] CORDIANO, H. V. – SALERNO, V. L. Study of Residual Stresses in Linearly Varying Biaxial-Stress Fields. *Experimental Mechanics* 9. 1969. pp. 17-24.

[10] FLAMAN, M. T. Brief Investigation of Induced Drilling Stresses in the Center-Hole Method of Residual-Stress Measurement. *Experimental Mechanics 22*. No. 1. 1982. pp. 26-30.

[11] GO, C. G. – LIN, Y. S. Determination of Initial-Strain Variation with Depth in In-situ Rock Masses by Hole-Drilling Method. *Proceedings SEM Spring Conference on Experimental Mechanics*. Houston, Texas, USA, 1987. pp. 732-736.

[12] HÄUSLER, H. – KÖNIG G. - KOCKELMANN H. On the Accuracy of Determining the Variation with Depth of Residual Stresses by Means of the Hole-drilling Method. Residual Stresses in Science and Technology. Garmisch-Partenkirchen, 1986. pp. 257-264.

[13] CHEROUAT, A. – MONTAY, G. – LU, J. Study of Residual Stresses in Complex Parts by Experimental and Numerical Methods. *ECRS 6: Proceedings of the 6th European Conference on Residual Stresses, Materials Science Forum*. 404-4. 2002. pp. 251-256.

[14] KABIRI, M. Nonuniform Residual-stress Measurement by Hole-Drilling Method. *Experimental Mechanics 24*. No. 4. 1984. pp. 328-336.

[15] KABIRI, M. Toward More Accurate Residual-Stress Measurement by the Hole-Drilling Method - Analysis of Relieved-Strain Coefficients. *Experimental Mechanics*. Vol. 26, No.1. 1986. pp. 14-21.

[16] KIM, C – YANG, W. H. – HEO, S. P. Influence of Inclined Holes in Measurement of Residual Stress by the Hole Drilling Method. *KSME International Journal (Korean Society of Mechanical Engineers)*. J 15: (12). Dec 2001. pp. 1647-1654.

[17] KÖNIG, G. – KUßMAUL, K. *Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten der Bohrlochmethode zur Eigenspannungsmessung unter Berücksichtigung plastischer Efekte*. DVM-Tagung. Bad Nauheim, 1987.

[18] LAKE, B. R. – APPL, F. J. – BERT, C. W. An Investigation of the Hole-Drilling Technique for Measuring Residual Stress in Rectangularly Orthotropic Materials. *Experimental Mechanics 10*. No. 6. 1970. pp. 233-239.

[19] LU, J. (ed.) *Handbook of Measurement of Residual Stresses*. Lilburn: Fairmont Press, 1996

[20] LUH, G. C. – HWANG, R. M. Measuring Non-Uniform Residual Stress in Thin Plates by a Proposed Hole-Drilling Strain Gauge Method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 15, No. 2. 1999. pp. 103-113.

[21] MONTAY, G. – et al. Determining Residual Stress in Spherical Components: A New Application of the Hole-Drilling Method. *Journal of Testing and Evaluation*. Vol. 32, No. 1. January 2004. pp. 73-79.

[22] PETRUCCI, G. - ZUCCARELLO, B. A New Calculation Procedure for Non-Uniform Residual Stress Analysis by the Hole-Drilling Method. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. Vol. 33, No.1. January, 1998. pp. 27-37.

[23] SCHAJER, G. S. Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling method. Part I - Stress Calculation Procedures. *Transactions of the ASME, ser. H – Journal of Engineering Materials and Technology.* Vol. 110, No. 4. October 1988. pp. 338-343.

[24] SCHAJER, G. S. Measurement of Non-Uniform Residual-Stresses Using The Hole-Drilling Method. Part II - Practical Application of the Integral Method. *Transactions of the ASME, ser. H – Journal of Engineering Materials and Technology.* Vol. 110, No.4. October 1988. pp. 344-349.

[25] SCHAJER, G. S. Use of Displacement Data to Calculate Strain Gauge Response in Non-Uniform Strain Fields. *Strain*. Vol. 29, No. 1. 1993. pp. 9-13.

[26] SCHAJER, G. S. – YANG, L. Residual-stress Measurement in Orthotropic Materials Using the Hole-drilling Method. *Experimental Mechanics*. Vol. 34., No. 4. 1994. pp. 324-333.

[27] SCHAJER, G. S. – ALTUS, E. Stress Calculation Error Analysis for Incremental Hole-Drilling Residual Stress Measurements. *Transactions of the ASME – Journal of Engineering Materials and Technology.* Jan 1996. pp. 120-126.

[28] ŠVANTNER, M. *Zjišťování zbytkových napětí ve vícevrstvých strukturách*. Plzeň, 2004. Disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd.

[29] VANGI D. Residual Stress Evaluation by the Hole-Drilling Method with Off-Center Hole: An Extension of the Integral Method. *Transactions of the ASME – Journal of Engineering Materials and Technology.* Vol. 119, No. 1. January 1997. pp. 79-85.

[30] VISHAY MEASUREMENT GROUP Inc. *Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method*. TN 503 – 5. Raleigh, North Carolina, 1993.

[31] VLK, M. at al. *Experimentální mechanika*. Brno, 2003. <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/umt/exp.mech.pdf>

[32] WERN, H. *Finite-Element Solutions for Mechanical Drilling Methods: A* New Integral Formalism. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. Vol. 63. 1995. pp. 365-372.

[33] WERN, H. A New Approach to Triaxial Residual Stress Evaluation by the Hole Drilling Method. *Strain*. Vol. 33, No. 4, November 1997. pp. 121-125.

[34] YAN, Z. H. – WU, S. Y. - PIN, L. Y. - JUN, C. Y. On the Correction of Plasticity Effect at the Hole Edge when Using the Centre Hole Method for Measuring High Welding Residual Stress. *Strain*. 32 (4). 1996. pp. 125-129.

[35] ZHU, W. X. – SMITH, D. J. Residual Stresses by Hole-Drilling in Curved Components. *In Proceedings of Recent Advances in Experimental Mechanics*. 1994. pp. 777-782.

Autorovy publikace související s disertační prací

[36] ŠVAŘÍČEK, K. *Teoretické stanovení kalibračních konstant pro měření zbytkových napětí odvrtávací metodou*. Brno, 2002. Diplomová práce na VUT v Brně, FSI.

[37] ČECH, J. – ZALABA, R. – ŠVAŘÍČEK, K. Applying Numerical Methods to the Calculation of Residual Stress by the Drill-Hole Method in Al-Castings. *Sborník Technológia 2003*. Strojnícka fakulta STU v Bratislave, 2003. ISBN 80-227-1935-8.

[38] ČECH, J. – ZALABA, R. – ŠVAŘÍČEK, K. – TUČEK, J. – ZÍKA, J. Experimentální možnosti stanovení zbytkových pnutí u Al slitin. *Sborník konference Slévárenské pochody při výrobě odlitků*. Vědeckotechnická společnost západních Čech, 2003.

[39] ČECH, J. – ZALABA, R. – PALÁN, K. – KRAUTSCHNEIDER, R. – ZÍKA, J. – ŠVAŘÍČEK, K. – BAŘINOVÁ, D. Možnosti hodnocení zbytkových pnutí u Al slitin experimentálně a pomocí simulace. *Sborník 5. mezinárodní vědecké konference TRANSFER 2003*. Trenčianská univerzita A. Dubčeka v Trenčíne, 2003. ISBN: 80-8075-001-7.

[40] ČECH, J. – ZALABA, R. – PALÁN, K. – ŠVAŘÍČEK, K. – BAŘINOVÁ, D. Možnosti stanovení zbytkových pnutí u slitin hliníku. *Slévárenství*. vol. 51, č. 10. 2003. ISSN: 0037-6825.

[41] ŠVAŘÍČEK, K. Určení kalibračních koeficientů metodou konečných prvků pro měření homogenního zbytkového napětí odvrtávací metodou. *Sborník 41. konf. EAN*. Milovy, 2003. s. 101-102.

[42] ČECH, J. – PALÁN, K. – ZALABA, R. – ŠVAŘÍČEK, K. – BAŘINOVÁ, D. Comparison of the Experimental and the Simulation Method of Establishing Residual Stress in Al-alloys. *Archives of foundry Polish Academy of Sciences Department*. PAN – Katovice, 2004. ISBN: 1642-5308.

[43] ČECH, J. – RUSÍN, K. – ZEMČÍK, L. – ZALABA, R. – ŠVAŘÍČEK, K. – BAŘINOVÁ, D. Comparison of the Experimental and the Simulation Method of Establishing Residual Stress in Aluminium Alloys. *Conference and Exhibition on New Developments in Metallurgical Process Technology*. Associazione Italiana di Metallurgia, 2004. ISBN: 88-85298-51-6.

[44] ŠVAŘÍČEK, K. – VLK, M. Ověření platnosti funkčního předpisu pro měření zbytkové napjatosti metodou vrtání otvoru a ověření necitlivosti koeficientů „A“ a „B“ na směru uvolněné deformace při jednoosé napjatosti tělesa. *Seminář: Nové přístupy v experimentálním vyšetřování zbytkových napětí a jejich vlivu na integritu a životnost součástí a konstrukcí (1. část)*. ČVUT v Praze, 21.10.2004. Nepublikováno.

[45] ŠVAŘÍČEK, K. – VLK, M. *Rozvoj odvrtávací metody pro měření zbytkové napjatosti*. Grant FRVŠ. číslo projektu: 1529/2004. Hodnotící komise: 25. 2. 2005.

[46] ŠVAŘÍČEK, K. – VLK, M. Zhodnocení použitelnosti ASTM E-837-01 pro tenzometrickou růžici RY 61 S. *Sborník 7. konf. Applied Mechanics*. Hrotovice, 2005. ISBN 80-214-2373-0. s. 105-106.

[47] ŠVAŘÍČEK, K. – VLK, M. Porovnání procedury ASTM E 837-01 a integrální metody pro výpočet zbytkové napjatosti nehomogenní po hloubce. *Sborník 11. konf. Inženýrská mechanika*. Svratka, 2005. s. 303-304.

[48] ŠVAŘÍČEK, K. – VLK, M. Rozvoj metody vrtání otvoru do oblasti pružně plastických deformací v tenké stěně. *Sborník 43. konf. EAN*. Skalský Dvůr, 2005. ISBN 80-214-2941-0. s. 87-88.

[49] ŠVAŘÍČEK, K. – VLK, M. Stanovení zbytkových napětí pomocí metody vrtání otvoru v oblasti pružně plastických deformací. *Sborník 21. konf. Computional mechanics*. Vol. II. Nečtiny, 2005. ISBN 80-7043-400-7. s. 589-596.

[50] ŠVAŘÍČEK, K. – VLK, M. Residual Stress Evaluation by the Hole-Drilling Method with Eccentric Hole. *Engineering Mechanics*. Brno, 2006.

[51] ŠVAŘÍČEK, K. – VLK, M. Rozvoj odvrtávací metody pro případ excentrického otvoru. *Sborník 8. konf. Applied mechanics*. Srní, 2006. s. 99-100.

[52] ŠVAŘÍČEK, K. – VLK, M. A Development of The Hole-Drilling Method with an Off-Center Hole for the Residual Stress Measurement. *Sborník 12. konf. Inženýrská mechanika*. Svratka, 2006. s. 370-371.

[53] ŠVAŘÍČEK, K. – VLK, M. The Residual Stress Determination by the Hole Drilling Method by Means of the Influence Function. *Sborník 12. konf. Inženýrská mechanika*. Svratka, 2006. s. 368-369.

[54] ŠVAŘÍČEK, K. – VLK, M. Spolehlivost stanovených zbytkových napětí metodou vrtání otvoru pro nejisté vstupní parametry. *Sborník konf. Pravděpodobnost porušování konstrukcí*. Brno, 2006. s. 125-134.

[55] JANÍČEK, P. – ŠVAŘÍČEK, K. – VLK, M. Systémové pojetí určování zbytkové napjatosti odvrtávací metodou. *Sborník konf. Dynamika tuhých a deformovatelných těles,* Ústí nad Labem, 2006. s. 87-96.

[56] ŠVAŘÍČEK, K. – VLK, M. Určení zbytkových napětí v pružně plastické oblasti metodou vrtání otvoru pomocí iteračního řešení MKP. *Sborník konf. Computational Mechanics Nečtiny*, 2006. s. 643-648.

ŽIVOTOPIS

Osobní údaje:

Jméno a příjmení:	Karel Švaříček
Datum a místo narození:	26. prosinec 1978, Třebíč
Národnost, státní občanství:	česká, Česká republika
Trvalé bydliště:	Heraltice 44, 675 21 Okříšky
Telefon:	+420 737 330 122
E-mail:	k.svaricek@seznam.cz

Vzdělání:

1993 – 1997	Střední průmyslová škola Třebíč, obor Strojírenství
1997 – 2002	VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, obor Aplikovaná mechanika, specializace Mechatronika Téma diplomové práce: Teoretické stanovení kalibračních konstant pro měření zbytkových napětí odvrtávací metodou
2002 – 2007	VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, obor Inženýrská mechanika Téma disertační práce: Využití numerických simulací a neuronových sítí ke zdokonalení odvrtávací metody zjišťování zbytkové napjatosti

Odborná praxe:

2003 – 2004	Plný pracovní úvazek u firmy L. K. Engineering, roční služební cesta v USA ve firmě AREVA (dříve FRAMATOME). Pozice: výpočtář – analytik (MKP výpočty vnitřních částí jaderných zařízení)
2004	Grant Fondu rozvoje vysokých škol: Rozvoj odvrtávací metody pro měření zbytkové napjatosti
2006	Grant Fondu vědy FSI: Rozvoj metody vrtání otvoru pro měření zbytkové napjatosti do oblasti pružně plastických deformací pomocí neuronových sítí
2002–2006	Vedení cvičení předmětů: Technická mechanika I Statika Pružnost a pevnost I

Jazykové znalosti:

Anglický jazyk

ABSTRAKT

V práci je definována zbytková napjatost, je uveden její význam a způsoby měření se zaměřením na metodu vrtání otvoru. Je zde popsána podstata metody vrtání otvoru s předpoklady této metody, ze kterých plyne oblast jejího použití. Na základě rešeršní studie byla stanovena podstatná omezení použitelnosti metody vrtání otvoru.

Hlavními problémy, omezující použitelnost odvrtávací metody, jsou nehomogenní napjatost po hloubce, excentricita otvoru vzhledem ke středu tenzometrické růžice, vyhodnocení zbytkové napjatosti v pružně plastické oblasti z důvodu vysokých hodnot redukovaných napětí a otvoru coby koncentrátoru napětí. Dále je důležitá znalost nejistot vypočtené zbytkové napjatosti a její citlivost na vstupních parametrech. Jsou vybrána, případně navržena, nová vhodná řešení uvedených problémů, u kterých je proveden teoretický rozbor a ověřena správnost, přesnost a tím i vhodnost těchto řešení.

Hlavním přínosem této práce je rozvoj odvrtávací metody pro případ pružně plastických deformací v okolí otvoru. Tento problém je úspěšně vyřešen pomocí numerických simulací, sloužících ke stanovení dostatečně velké množiny uvolněných deformací a odpovídajících zbytkových napjatostí a neuronových sítí, které slouží jako aproximátor mezi těmito zbytkovými napjatostmi a uvolněnými deformacemi. Tento problém pružně plastických deformací je také úspěšně vyřešen pomocí navrženého iteračního řešení prostřednictvím metody konečných prvků.

ABSTRACT

This thesis defines residual stresses, its significance and methods of determination. The focus is on the hole drilling method. The principle of the hole drilling method, assumptions and usage are described. Limitations of this method are listed from literature survey. Some essential limitations are solved very well; some limitations are still a problem to be solved. The main limitations are described in this thesis.

The main limitative problems are variation stresses along a depth, an eccentric hole, elastic-plastic strains near the hole due to hole stress concentration at high residual stresses, residual stress uncertainties and a sensitivity for input parameters. The suitable methods are chosen to solve these problems or own suitable solutions are proposed. These methods are analyzed and its accuracies are verified.

The essential contribution of this thesis is a development of the hole drilling method for elastic-plastic deformations. This problem is successfully solved by numerical simulations to obtaining released strains and corresponding residual stresses. This set of strains-stresses is approximated by a neural network. This problem of elastic-plastic deformations is also successfully solved by the designed iterative solution by finite element method.