

ZAHRNUTÍ EXCENTRICITY U ODVRTÁVACÍ METODY PRO VYHODNOCENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ

ECCENTRICTY AND HOLE DRILLING METHOD AND RESIDUAL STRESS EVALUTION

Karel DOUBRAVA, Tomáš MAREŠ, Zdeněk KULIŠ, Karel VÍTEK¹

Abstrakt

Tento článek se zabývá problematikou zjišťování zbytkových napětí pomocí odvrtávací metody, kdy je uvažován vliv excentricity vrtaného otvoru vůči středu tenzometrické růžice. Tento stav je numericky simulován pomocí metody konečných prvků a výsledky tohoto numerického experimentu pak slouží k uvrcení závislosti odezvy uvolněných deformací na poloze excentrického otvoru za daného stavu napjatosti. Byly sestaveny vztahy popisující výše zmíněnou situaci a na jejich základe pak vytvořen postup k určení zbytkových napětí. Tento postup byl aplikován na výsledky numerického experimentu a dále pak na data získaná při experimentálním měření. Z výsledku vyplývá vliv excentricity otvoru a možnost zpřesnění výsledných hodnot zbytkového napětí na dané konstrukci v případě excentricity otvoru.

Klíčová slova: odvrtávací metoda, excentricita, MKP, zbytkové napětí.

Abstract

Problem of investigation of residual stresses by means of hole drilling method with influence of eccentricity of drilled hole is studied. This problem was simulated by means of FEM model and results of this simulation were used to found new formula for describing state of the residual stress in a construction. Based on these results, the procedure of residual stress determination was designed. This methodology was applied to the outcome of the numerical experiment. Influence of eccentricity of the hole is described and proposed procedure of investigation can improve residual stress determination.

Key words: hole-drilling method, eccentricity, FEM, residual stress.

ÚVOD

Výroba součástí sebou přináší namáhání materiálu při technologických operacích, kterým je příslušná součást podrobena. Většina těchto technologických operací má za následek vznik zbytkových napětí. Tato napětí mohou mít různý charakter ať co se týče charakteristiky orientace, hloubkového či plošného gradientu. Znalost zbytkových napětí se stává podstatnou při posuzování zatížení dané konstrukce. V současné době je po mnohých výrobcích tato znalost požadována jejich zákazníky (např. [1,2,3]).

V posledních letech lze zaznamenat znatelný nárůst možností výpočetní techniky a vzrůst významu numerických simulací při návrhu výrobku. I přes pokrok ve výkonu a ve vlastnostech numerických metod, zvláště pak metody konečných prvků, není v současné době možné u většiny součástí přesně namodelovat proces vzniku daného výrobku, čímž by bylo možné spočítat hodnoty

¹ Ing. Karel DOUBRAVA, Ing. Tomáš MAREŠ, PhD., doc. Ing. Zdeněk KULIŠ, CSc., Ing. Karel VÍTEK, CSc. ÚMBaM, FSj ČVUT v Praze Karel.Doubrava@fs.cvut.cz, Tomáš.Mareš@fs.cvut.cz, Zdenek.Kulis@fs.cvut.cz, Karel.Vitek@fs.cvut.cz
Lektoroval: Dr.h.c. prof. Ing. František TREBUŇA, CSc., KAMaM, SJF TU v Košiciach, frantisek.trebuna@tuke.sk

zbytkových napětí na konci výrobního procesu. Z tohoto důvodu hrají experimentální metody stále významnou roli při určování hladiny zbytkových napětí konstrukcí.

Jednou z nejrozšířenějších experimentálních metod pro určování zbytkových napětí je metoda odvrtávací. Tato metoda je založena na narušení silové a momentové rovnováhy uvnitř tělesa vyvrtáním kruhového otvoru, ať už slepého nebo průchozího. Velikost vyvrtaného otvoru bývá často vůči rozměrům zkoumané konstrukce zanedbatelná a proto se tato metoda řadí mezi metody semidestruktivní. Zaznamenání uvolněných deformací se nejčastěji provádí pomocí speciální tenzometrické růžice, kdy vrtání otvoru se provádí do středu této růžice.

Výrobci rozličné řady produktů jsou svými zákazníky donuceni deklarovat hodnoty zbytkových napětí v jejich výrobcích, kdy požadují zjišťování zbytkových napětí dle uznávaných norem. Nejčastěji vyžadovaná norma zabývající se touto otázkou je ASTM STANDARD E837. V této normě jsou předepsány podmínky zhotovení otvoru a vyhodnocení napětí. V případě excentricity vyvrtaného otvoru vůči středu tenzometrické růžice je tato norma konzervativní a neumožňuje zohlednit vyšší hodnoty excentricity otvoru, s kterými jsme se setkali při praktické aplikaci odvrtávací metody. Proto bylo přistoupeno k nalezení metody, která by zohlednila excentricitu vrtaného otvoru při výpočtu zbytkových napětí.

POSTUP ŘEŠENÍ

Pro popis stavu napjatosti v okolí otvoru vzniklého aplikací odvrtávací metody byla použita metoda konečných prvků. Byl simulován experiment, tyč byla namáhána jednoosým tahem a bylo provedeno postupné vrtání otvoru. Cílem modelu bylo co nejpřesněji simulovat stav při experimentální kalibraci. Proto byla namodelována tyč zatížená jednoosým tahem a na ní bylo provádělo odvrtání otvoru. Signál z jednotlivých tenzometru byl odečítán jako deformace jednotlivých prvků na vinutí a následnou integrací těchto deformací, kdy vzhledem ke komplikovanosti výsledného modelu byla využita objektovost prostředí CAE a pro vytvoření cesty pro odečet signálu bylo vytvořeno pomocné makro. Odvrtání otvoru bylo namodelováno postupným odebíráním prvků z oblasti otvoru. Po odebrání vrstvy odpovídající odvrtání daného kroku byl proveden výpočet a po zkonvergování výpočtu byla odebrána další vrstva. Po ukončení výpočtu byly výsledky uloženy ve výsledkovém souboru ABAQUSu. Vzhledem ke komplexnosti výsledkového souboru bylo pro získání signálu nutno vytvořit další skript.

Po namodelování zkušební tyče byl proveden výpočet pro případ centrického vrtu vůči středu tenzometrické růžice. Tyč byla zatížena napětím o velikosti 1 MPa. Signály získané tímto výpočtem byly použity pro nalezení funkce popisující vztah mezi uvolněnými deformacemi a zbytkovým napětím v místě vrtu otvoru. Za předpokladu volby obecné závislosti deformace na napětí lze deformaci ve směru udaném úhlem α vyjádřit vztahem

$$\varepsilon(\alpha) = K(\alpha)\sigma. \quad (1)$$

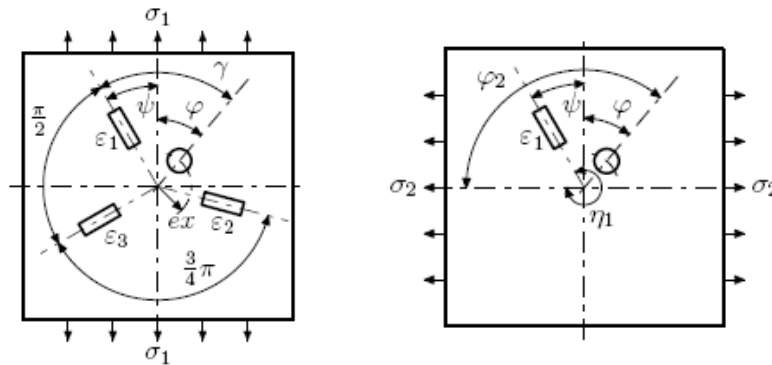
Jako bázová funkce pro $K(\alpha)$ byl zvolen rozvoj Fourierovy řady, takže pro vztah mezi napětím a deformací v případě rovinné napjatosti dané velikostí hlavních napětí σ_1 a σ_2 platí

$$\varepsilon(\alpha) = \left[\sum_j^n K_j \cos \alpha + L_j \sin \alpha \right] \sigma_1 + \left[\sum_j^n K_j \cos(\alpha + \pi/2) + L_j \sin(\alpha + \pi/2) \right] \sigma_2. \quad (2)$$

Takto získané výsledky byly použity pro analýzu dat změřených při experimentu zjišťování zbytkových napětí na trubkovém ohybu [3,4].

Pro zjištění vlivu polohy excentrického otvoru vůči geometrii tenzometrické růžice byl použit konečněprvkový model popsáný v předcházejícím odstavci. Namodelování excentricity bylo provedeno posuvem tenzometru vůči středu otvoru. Pro posuv tenzometru bylo vytvořeno makro, kdy vstupem tohoto makra je velikost excentricity e_x a úhel φ udávající směr posuvu

otvoru vůči ose napětí σ_1 . Po provedení výpočtu pak bylo možné s využitím dříve vytvořených maker odečíst deformace po vyvrtání otvoru do příslušné hloubky.



a) Poloha 1. tenzometru při zatížení σ_1 b) Poloha 1. tenzometru při zatížení σ_2

Obr.1 Orientace různé vůči zatížení

Pro odvození vztahu pro výpočet zbytkových napětí byla použita geometrie tenzometrické růžice RY61S firmy HBM. Pro popis deformací byla zvolena funkce s násadou dvojnásobné goniometrické funkce. Zápis goniometrické řady byl volen pomocí exponenciálního rozvoje. Potom lze obecně zapsat deformaci jako funkci napětí a bázové funkce, kdy úhel ψ udává orientaci 1. tenzometru vůči směru napětí, φ je úhel mezi směrem napětí σ_1 a polohou otvoru a ex je velikost excentricity vyvrtaného otvoru vůči středu tenzometrické růžice:

$$\varepsilon(\varphi, \psi) = \sum_{k,l=-K}^K C_{kl}^h e^{ik\varphi} e^{il\psi} \sigma \quad (3)$$

Excentricita otvoru se předpokládá po celé hloubce konstantní. V případě deformace změřené tenzometrem číslo 1 po vyvrtání otvoru do hloubky h a při zatížení vzorku napětím σ_1 lze psát

$$\sigma_1 \varepsilon_1^h(\varphi, \psi) = \sum_{k,l=-K}^K C_{kl}^h e^{ik\varphi} e^{il\psi} \sigma_1 \quad (4)$$

Obdobně lze zapsat vztah pro deformaci změřenou tenzometrem 1 při zatížení vzorku napětím σ_2 , kdy po úpravách

$$\sigma_2 \varepsilon_1^h(\varphi, \psi) = \sum_{k,l=-K}^K C_{kl}^h e^{ik(\varphi+\frac{\pi}{2})} e^{il(\psi+\frac{3}{2}\pi)} \sigma_2 \quad (5)$$

Za předpokladu platnosti zákona superpozice je možné vztahy (4) a (5) sečíst a potom deformaci změřenou tenzometrem 1 a od zatížení rovinou napjatostí vyjádřit vztahem:

$$\varepsilon_1^h(\psi) = \sum_{k,l=-K}^K C_{kl}^h e^{ik(\gamma-\psi)} e^{il\psi} \sigma_1 + \sum_{k,l=-K}^K C_{kl}^h e^{ik(\gamma-\psi+\frac{\pi}{2})} e^{il(\psi+\frac{3}{2}\pi)} \sigma_2 \quad (6)$$

Obdobně vztahy lze odvodit pro deformace změřené 2. tenzometrem

$$\varepsilon_2^h(\psi) = \sum_{k,l=-K}^K C_{kl}^h e^{ik(\gamma-\psi)} e^{il(\psi+\frac{\pi}{4})} \sigma_1 + \sum_{k,l=-K}^K C_{kl}^h e^{ik(\gamma-\psi+\frac{\pi}{2})} e^{il(\psi+\frac{3}{4}\pi)} \sigma_2 \quad (7)$$

a 3. tenzometrem

$$\varepsilon_3^h(\psi) = \sum_{k,l=-K}^K C_{kl}^h e^{ik(\gamma-\psi)} e^{il(\psi+\frac{\pi}{4})} \sigma_1 + \sum_{k,l=-K}^K C_{kl}^h e^{ik(\gamma-\psi+\frac{\pi}{2})} e^{il\psi} \sigma_2 \quad (8)$$

Rovnice (6) – (8) lze substitucemi upravit do tvaru

$$\varepsilon_1^h = D_{11}\sigma_1 + D_{12}\sigma_2, \quad (9)$$

$$\varepsilon_2^h = D_{21}\sigma_1 + D_{22}\sigma_2, \quad (10)$$

$$\varepsilon_3^h = D_{31}\sigma_1 + D_{32}\sigma_2. \quad (11)$$

Vzájemnými úpravami těchto rovnic získáme vztahy pro hlavní napětí

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_1^h D_{32} - \varepsilon_3^h D_{12}}{D_{11}D_{32} - D_{31}D_{12}}, \quad (12)$$

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_1^h D_{31} - \varepsilon_3^h D_{11}}{D_{12}D_{31} - D_{32}D_{11}}. \quad (13)$$

S použitím předchozích vztahů a po úpravách je možné získat vztah, z něhož je možné vyjádřit úhel ψ

$$\sum_{k,l,p,s=-K}^K C_{kl}^h C_{ps}^h e^{ik\gamma} e^{ip\gamma} e^{i\psi(s+l-k-p)} \left[\varepsilon_1^h e^{ik\frac{\pi}{2}} e^{is\frac{\pi}{2}} e^{il\frac{3}{2}\pi} - \varepsilon_1^h e^{ik\frac{\pi}{2}} e^{is\frac{5}{4}\pi} + \right. \\ \left. + \varepsilon_2^h e^{ip\frac{\pi}{2}} - \varepsilon_2^h e^{il\frac{\pi}{2}} e^{ip\frac{\pi}{2}} e^{is\frac{3}{2}\pi} + \varepsilon_3^h e^{ik\frac{\pi}{2}} e^{il\frac{3}{2}\pi} e^{is\frac{3}{4}\pi} - \varepsilon_3^h e^{il\frac{3}{4}\pi} e^{ik\frac{\pi}{2}} \right] = 0 \quad (14)$$

Řešením této rovnice je velikost úhlu ψ , který určuje orientaci hlavních napětí a po dosazení do (12) a (13) pak i jejich velikost.

Kalibrační konstanty se určí na základě numerického experimentu. Dle vztahu (3) je zavedena funkce pro deformaci v případě zatížení jednotkovým napětím

$$\varepsilon^h(\varphi, \psi) = \sum_{k,l=-K}^K C_{kl}^h e^{ik\varphi} e^{il\psi} = \sum C_a^h B_a(\varphi, \psi), \quad (15)$$

funkce pro deformaci pak může být vyjádřena vztahem

$$\varepsilon(\varphi, \psi) = B(\varphi, \psi)C \quad (16)$$

V případě znalosti deformací pro daná φ a ψ je možné pomocí metody nejmenších čtverců (viz např. [5]) vyjádřit matici koeficientů při dané volbě báze funkce

$$C = [B^T B]^{-1} B^T \varepsilon \quad (17)$$

V daném případě φ nabývalo hodnot (0,355) po 5° a ψ nabývalo hodnot (0,345) po 15° a K udávající počet členů řady bylo zvoleno 5.

OVĚŘENÍ A POUŽITÍ METODY

Pro ověření metody byly provedeny výpočty napětí na základě deformací „odměřených“ na vytvořeném konečněprvkovém modelu. Model byl zatížen jednoosou napjatostí o velikosti $\sigma_I=1$ MPa. Z výsledku numerické simulace byly odečteny data, která jsou vynesena v tabulce 1. Úhel φ udává orientaci mezi směrem zatížení a orientací excentrického otvoru, ψ je úhel mezi tenzometrem 1 a směrem zatížení, γ je úhel mezi směrem excentricity otvoru a směrem 1. tenzometru.

Data odečtená z MKP modelu pro ověření metody

Tabulka 1

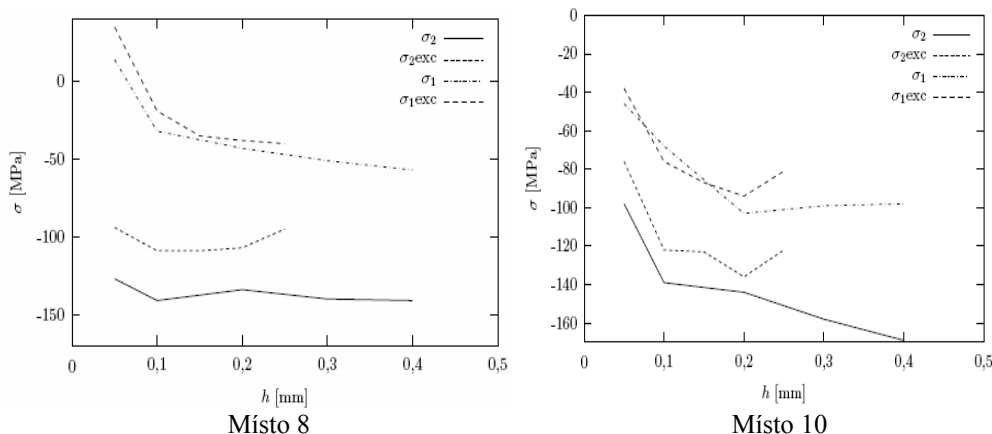
Ověření	h [mm]	φ [°]	ψ [°]	γ [°]	ε_1 [μi]	ε_2 [μi]	ε_3 [μi]
1	0,2	15	5	20	-0,203400304	-0,0486003273	0,0361370666
2	0,3	45	60	105	-0,016959020	0,0470718646	-0,2024848981
3	0,4	225	10	235	-0,424685822	-0,0613982251	0,0898552343
4	0,5	105	100	235	0,139264159	-0,4217115474	-0,6813172603

Výše uvedená data byla podrobena výpočtu pomocí prezentované metody. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 2. Z uvedených výsledků vyplývá, že odchylka od očekávaných hodnot se pohybuje v řádu procent a je tedy možné tuto metodu považovat za funkční.

Výsledky ověření **Tabulka 2**

Ověření	ψ [°]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]
1	8	1,05	-0,054
2	60	1,03	0,001
3	12	1,06	-0,003
4	99	0,97	0,006

Navržená metoda byla použita na spočtení zbytkových napětí pro data získaná v rámci experimentu prováděného na pracovišti odboru pružnosti a pevnosti ústavu mechaniky při řešení určování zbytkových napětí u trubkových ohybu [3]. Jednalo se o problém popisu zbytkových napětí u trubkového ohybu v případě vynechání technologické operace žihání a následného popouštění s ohledem na možné snížení výrobních nákladů firmy Modřanská potrubní. Experiment byl proveden pomocí zařízení MTS-3000 SINT. Souprava MTS-3000 [6] je zařízení k experimentálnímu určování zbytkových napětí pomocí odvrtávací metody. Dodavatelem tohoto zařízení je firma Hottinger Baldwin Messtechnik a výrobcem pak italská firma SINT Technology. Pro případ použití navrhované metody byly vybrány dvě měřená místa: místo 8 a místo 10. V místě 8 byla změřena excentricita 0,2 mm a její orientace oproti 1. tenzometru v ruzici byla $\gamma = 30^\circ$, v místě 10 pak byla změřena excentricita o velikosti 0,17 mm a orientaci $\gamma = 85^\circ$. Data jsou porovnána s výsledky získanými při neuvažování excentricity otvoru [7]. Výsledky jsou znázorněny v grafech na obr.2.



Obr.2 Porovnání vypočtených zbytkových napětí bez a s uvažováním excentricity otvoru

ZÁVĚR

V článku je popsána metoda výpočtu zbytkových napětí na základě odvrtávací metody, kdy je zohledněna excentricita otvoru vůči středu tenzometrické ruzice. Tato metoda je založena na vztazích odvozených pro danou geometrii tenzometrické ruzice. Koeficienty obsažené v těchto vztazích byly určeny na základě výsledku získaných z numerického experimentu. Numerický experiment byl proveden pomocí metody konečných prvků s použitím programu ABAQUS/CAE. Navržený postup byl ověřen dosazením hodnot deformací odečtených numerickou tenzometrickou ruzicí. Bylo dosaženo dobré shody mezi vypočteným napětím a napětím kdy maximální odchylka ve velikosti spočtených hlavních napětí a skutečným napětím v MKP modelu byla 6% (viz.

tabulka 2). Bylo provedeno vyhodnocení dat získaných při experimentálním měření, kdy byl zaznamenán rozdíl oproti výsledkům získaným bez uvažování excentricity otvoru. Tento rozdíl se pohyboval u jednotlivých hloubek v rozmezí procent až zhruba 20 procent (viz. obr.2). Navržený postup umožňuje zahrnout vliv excentricity při určování zbytkových napětí pomocí odvrťovací metody.

LITERATURA

- [1] HOLÝ, S., DOUBRAVA, K., VÁCLAVÍK, J., VÍTEK, K., WEINBERG, O.: *Determination of Residual Stress in Forgings of Turbine Rotors of Different Heat Treatment*. In Abstracts of 19th Danubia-Adria Symposium, p. 224–225. Committee for Mechanics of the Polish Academy of Sciences. 2000
- [2] HOLÝ, S., DOUBRAVA, K., VÁCLAVÍK, J., VÍTEK, K., WEINBERG, O.: *Určení velikosti zbytkových pnutí ve výkocích železničních náprav s rozdílným tepelným zpracováním*. In Experimental Stress Analysis, p. 105–108. Asociace strojních inženýrů. 2002
- [3] DOUBRAVA, K., VÍTEK, K., KULIŠ, Z., HOLÝ, S.: *Měření zbytkových napětí na trubkovém ohybu pomocí odvrťovací metody*. Technical Report FS 2052/03/09, ČVUT v Praze FS, Ústav mechaniky, Odbor pružnosti a pevnosti. 2003
- [4] DOUBRAVA, K., MAREŠ, T., ŠPANIEL, M., VÍTEK, K.: *Problematika vyhodnocování odvrťovací metody*. In Experimentální analýza napětí 2004, p. 47–50. Škoda Výzkum. 2004
- [5] MAREŠ, T.: *Základy konstrukční optimalizace*. Nákladem Tomáše Mareše, Praha. ISBN 80-239-6508-5. 2006
- [6] *Meßsystem zur Bestimmung von Eigenspanungen mit der Borlochmethode*. SINT Technology, 243-50041 Calenzano – Italy. 1999
- [7] DOUBRAVA, K., VÍTEK, K., MAREŠ, T., ŠPANIEL, M.: *Practical Application of Inovated Hole Drilling Method Theory for Residual Stress*. In 21st Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics, p. 22–23. Croatian Society of Mechanics. 2004