

EXPERIMENTÁLNY A ANALYTICKÝ PRÍSTUP K URČOVANIU KALIBRAČNÝCH KOEFICIENTOV PRE METÓDU ODVRTAVANIA

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL APPROACH TO DETERMINATION OF CALIBRATION COEFFICIENTS OF HOLE DRILLING METHOD

Peter SENKO, Fantišek TREBUŇA¹

Abstrakt

Metóda odvrtávania je najrozšírenejšia metóda merania zvyškových napäťí a môže byť považovaná za nedeštruktívnu pre veľké štruktúry. Zvýšenie presnosti metódy odvrtávania závisí od znalosti kalibračných koeficientov. Tieto závisia od geometrie tenzometrickej ružice. Pre určenie týchto koeficientov bol vytvorený postup s využitím metódy konečných prvkov.

Kľúčové slová: metóda odvrtávania, zvyškové napäťia.

Abstract

The hole-drilling method is the most popular mechanical method of residual stress measurement and can be considered as non-destructive for large structures. Increasing of precision of hole-drilling method depends by knowledge of calibrate coefficients. This depends on the geometry of strain gage rosette. Therefore another intention was create technique for determining these coefficients by the finite element method.

Key words: Hole drilling method, residual stress.

ÚVOD

V súčasnosti sa veľká pozornosť venuje zvyškovým napätiám. Sú to napäťia vznikajúce pri každom technologickom procese. Existuje množstvo deštruktívnych aj nedeštruktívnych metód, ktoré umožňujú určiť zvyškové napäťia v konštrukciách. Jednou z najpoužívanejších je metóda odvrtávania. Táto polodeštruktívna metóda je založená na meraní uvoľnenej deformácie pomocou špeciálnej tenzometrickej ružice počas vŕtania malého otvoru stanoveného profilu do povrchovej vrstvy materiálu. Tento postup je jednoduchý a je štandardizovaný normou ASTM E837-01. Metóda je veľmi univerzálna, použiteľná v laboratóriu aj v teréne pre konštrukcie rôznej veľkosti a tvaru. Pri určení zvyškových napäťí metódou odvrtávania, či už priechodným otvorom, alebo slepým otvorom musia byť známe koeficienty \bar{A} a \bar{B} (alebo \bar{a} a \bar{b}) aby bolo možné vypočítať napäťia z uvoľnených deformácií. Znalosť týchto koeficientov vo veľkej miere ovplyvňuje presnosť metódy. Nasledujúca časť sa preto venuje určovaniu kalibračných koeficientov s využitím experimentálneho a analytického prístupu.

EXPERIMENTÁLNE URČENIE KOEFICIENTOV

Správne vykonaná experimentálna kalibrácia koeficientov A a B je potenciálne najpresnejšou metódou určovania týchto koeficientov. [1, 4]. Tento postup berie automaticky do úvahy mechanické vlastnosti materiálu, geometriu tenzometrickej ružice, hĺbku otvoru a priemerovanie deformácií po ploche mriežky tenzometra. Jej základnou nevýhodou je však to, že musí byť zopakovaná vždy, keď sa použije iná geometria mriežky a otvoru.

¹ Ing. Peter SENKO, PhD., Dr.h.c., prof., Ing. TREBUŇA František, CSc., KAMaM, SjF TU v Košiciach, peter.senko@tuke.sk, frantisek.trebuna@tuke.sk
Lektoroval: prof. Ing. Stanislav HOLÝ, CSc., UMBaM, FSj ČVUT v Prahe, stanislav.holy@fs.cvut.cz

Princíp kalibrácie je podrobne rozpisany v norme ASTM E837-01 [1].

Treba však poznamenať, že hodnoty základných koeficientov \bar{A} , \bar{B} získané z konkrétneho kalibračného testu, sú striktne použiteľné iba na meranie zvyškových napäť pri meracích podmienkach, ktoré pre daný prípad presne odpovedajú kalibračným podmienkam a to pre:

- materiály s rovnakými elastickými vlastnosťami,
- rovnakú geometriu tenzometrickej ružice,
- rovnakú veľkosť otvoru,
- rovnaký tvar otvoru,
- rovnomerné rozloženie napäťia po hĺbke.

ANALYTICKÉ URČENIE KALIBRAČNÝCH KOEFICIENTOV

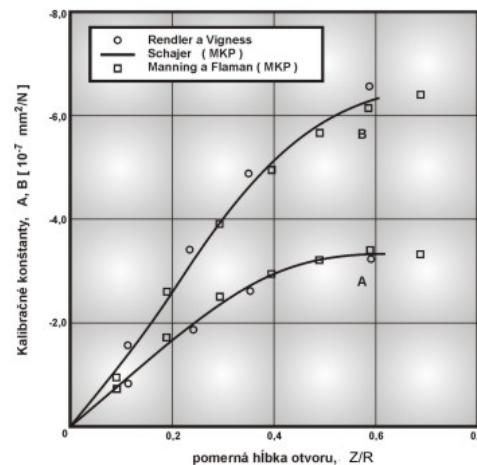
Určovanie zvyškových napäťí odvŕtavacou technikou zvyčajne využíva Kirschovo riešenie pre popis vzťahu medzi uvoľnenou deformáciou a napätiom. Tieto vzťahy platia za predpokladu

- geometrické hranice súčiastky sú dostatočne ďaleko (v nekonečne) od otvoru,
- povrchové deformácie v okolí otvoru konečnej hĺbky (slepého otvoru) sú podobné napätiám v okolí priechodného otvoru v rovnakej tenkej stene.

Platnosť týchto predpokladov bola overovaná numerickým výpočtom metódou konečných prvkov. Schajer [7], a Manning a Flaman [2, 3] numericky určovali kalibračné koeficienty slepých otvorov pre rôzne hĺbky.

Ako Schajer tak aj Manning a Flaman vyvinuli konečno-prvkové modely na určenie platnosti koeficientov A a B resp. \bar{a} a \bar{b} (obr.1). Horizontálna súradnica Z/R (obr.1) je podielom hĺbky otvoru a stredného polomeru tenzometrickej ružice ($R = 2,56$ mm). Okrem jednotlivých konečno-prvkových odhadov od Schajera a Manninga, obr.1 obsahuje hodnoty konštánt A a B určených Rendlerom a Vignessom. Oba odhady pomocou metódy konečných prvkov súhlasia s experimentom.

Schajer použil štvoruholníkové prvky, ktoré majú lineárnu interpoláciu módov a otestoval prinajmenšom dva rôzne modely sietí s rovnakým výsledkom. Vo svojej analýze Manning a Flaman použili voľbu cyklickej symetrie v programe MSC/NASTRAN. Obe numerické riešenia sa navzájom dobre zhodujú aj s experimentálnymi hodnotami. Rozdiely sú pravdepodobne spôsobené druhom numerického vyhodnotenia deformácie. Kým Schajer predpokladal deformáciu konštantnú pozdĺž základne tenzometra, Manning uvažoval s premenlivou deformáciou po dĺžke tenzometra.



Obr.1 Porovnanie experimentálne a numericky získaných hodnôt kalibračných konštánt A a B

URČENIE KALIBRAČNÝCH KOEFICIENTOV METÓDY ODVÝTAVANIA PRE NAPÄTIE ROVNOMERNE ROZLOŽENÉ PO HĽBKE OTVORU

Analytické určovanie kalibračných koeficientov pre metódu odvýtavania bolo už realizované viacerými autormi. Touto problematikou sa už zaoberali napr. Schajer [7] a Manning a Flaman [2, 3]. V zásade možno túto problematiku rozdeliť do dvoch časťí:

1. Určenie koeficientov pre priechodný otvor.
2. Určenie koeficientov v jednotlivých príastatkoch hľbky pre slepý otvor.

V prvom prípade koeficienty A a B možno určiť použitím Kirschovho riešenia pre konkrétny bod vo vzdialosti R od stredu vyvýtaného otvoru o polomere R_0 v tvare

$$A = -\frac{1+\mu}{2E} \left(\frac{R_0}{R} \right)^2, \quad (1a)$$

$$B = -\frac{1+\mu}{2E} \left[\frac{4}{1+\mu} \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 - 3 \left(\frac{R_0}{R} \right)^4 \right]. \quad (1b)$$

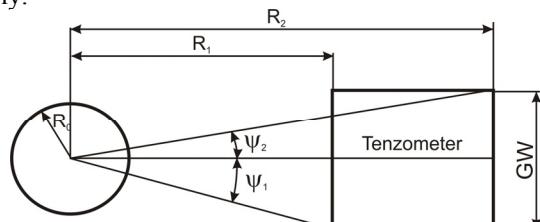
V praxi sa na meranie pomerných deformácií používajú tenzometrické ružice a každý tenzometer má konkrétné rozmery. Z toho dôvodu je potrebné určenie koeficientov \bar{A} a \bar{B} . Tieto sa získajú integráciou koeficientov A a B po ploche snímača.

Pre koeficienty \bar{A} a \bar{B} boli odvodene nasledovné vzťahy

$$\bar{A} = -\frac{(1+\mu)R_0^2}{E(R_2 - R_1)GW} (\psi_1 - \psi_2), \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \bar{B} = & -\frac{(1+\mu)R_0^2}{E(R_2 - R_1)GW} \left[\frac{2(1-\mu)}{1+\mu} (\psi_1 - \psi_2) + \sin 2\psi_1 - \sin 2\psi_2 - \right. \\ & \left. - \frac{1}{8} \left(\frac{R_0}{R_1} \right)^2 (2 \sin 2\psi_1 + \sin 4\psi_1) + \frac{1}{8} \left(\frac{R_0}{R_2} \right)^2 (2 \sin 2\psi_2 + \sin 4\psi_2) \right], \end{aligned} \quad (2b)$$

ktoré vyjadrujú koeficienty A a B integrované po ploche celého snímača ale nie len po ploche mriežky. Tento postup výpočtu je v nasledujúcej časti označený ako postup výpočtu č. 1. Obr.2 definuje použité symboly.



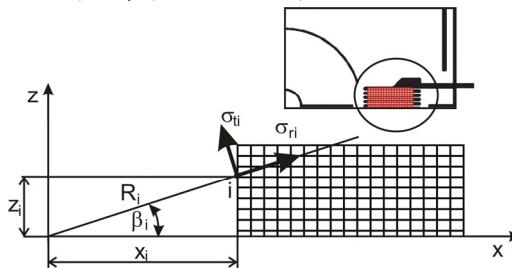
Obr.2 Definovanie symbolov

Koeficienty \bar{A} a \bar{B} sú závislé od rozmeru otvoru, od rozmerov použitej tenzometrickej ružice a tiež od materiálových vlastností skúmanej vzorky.

Ďalšou možnosťou určenia koeficientov \bar{A} a \bar{B} je využitie postupu, v ktorom oblasť tenzometrickej mriežky rozdelíme pomocou siete (obr.3), ktorej pozdĺžne čiary sa zhodujú s rozmiestnením drôtikov v tenzometrickej mriežke a spolu s priečnymi čiarami v priekope vytvárajú množinu bodov, v ktorých určíme pomerné deformácie. Pomernú deformáciu snímača

potom dostaneme ako priemer pomerných deformácií v týchto bodoch. Z týchto pomerných deformácií potom môžeme určiť koeficienty \bar{A} a \bar{B} zo vzťahu

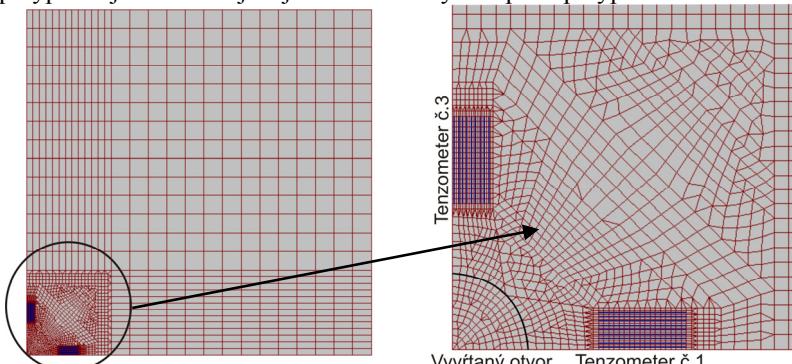
$$\varepsilon_r = \sigma_x (\bar{A} + \bar{B} \cos 2\beta) + \sigma_y (\bar{A} - \bar{B} \cos 2\beta). \quad (3)$$



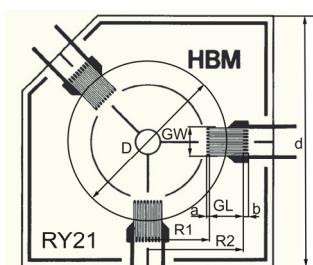
Obr.3 Model tenzometra

Tento postup výpočtu je v nasledujúcej časti označený ako postup výpočtu č. 2

Integráciu pomernej deformácie po ploche tenzometrickej mriežky môžeme tiež simulovať pomocou metódy konečných prvkov. Na výpočet bol použitý program Cosmos/M. Podobne ako v predchádzajúcom prípade rozdelíme plochu mriežky na jednotlivé drôtky, ktoré modelujeme pomocou prútového prvku (v Cosmos/M je prvok označený ako TRUSS2D). Pomernú deformáciu v snímači určíme potom spríemerovaním pomerných deformácií z jednotlivých prvkov. Z týchto pomerných deformácií potom určíme pomocou vzťahu (3) koeficienty \bar{A} a \bar{B} . Obr. 4 znázorňuje siet' konečných prvkov použitú na model tenzometra. Tento postup výpočtu je v nasledujúcej časti označený ako postup výpočtu č. 3



Obr.4 MKP model tenzometrickej ružice



Obr.5 Ružica RY21

Na porovnanie boli určené koeficienty \bar{A} a \bar{B} pomocou všetkých troch spôsobov. Za vzor slúžila tenzometrická ružica RY21 od firmy HBM (obr.5) ktorá má rozmer

$$D = 13 \text{ mm} \qquad R1 = 5 \text{ mm}$$

$$GL = 3 \text{ mm} \qquad R2 = 8 \text{ mm}$$

$$GW = 2,5 \text{ mm}$$

Ružica aplikovaná na pravouhlú dosku, ktorá bola začažená v smere snímača 1, pričom bolo vyvodené napätie $\sigma = 100 \text{ MPa}$. Materiál vzorky nech má modul pružnosti v ľahu $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ a Poissonovo číslo $\mu = 0,3$.

Tabuľka 1 slúži na porovnanie hodnôt koeficientov \bar{A} a \bar{B} , ktoré boli získané rôznymi výpočtovými postupmi. Rozdiel medzi výsledkami je spôsobený tým, že v prvom prípade je výpočet uskutočnený ako integrácia kalibračných koeficientov po celej ploche snímača a v druhých dvoch prípadoch je uskutočnený výpočet iba po ploche mriežky daného snímača.

Koeficienty určené podľa jednotlivých spôsobov výpočtu **Tabuľka 1**

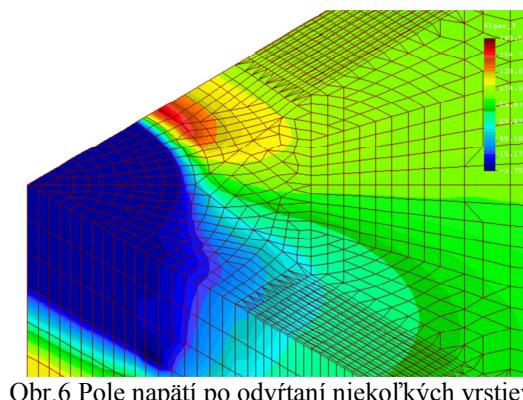
Spôsob výpočtu	1	2	3
Koeficient			
\bar{A} [MPa ⁻¹]	-5,021.10 ⁻⁷	-4,91.10 ⁻⁷	-4,93.10 ⁻⁷
\bar{B} [MPa ⁻¹]	-1,218.10 ⁻⁶	-1,07.10 ⁻⁶	-1,137.10 ⁻⁶

V prípade nepriechodného (slepého) otvoru sa postup výpočtu podľa prvých dvoch postupov nemôže uplatniť a to z toho dôvodu, že obidva riešenia využívajú Kirschovo riešenie na určenie v prvom prípade priamo koeficientov a v druhom prípade k určenie pomernej deformácie v snímači. Kirschovo riešenie v uzavretom tvare však pre slepý otvor neexistuje. Z toho vyplýva že vhodným riešením je použitie metódy konečných prvkov, ktorá takého obmedzenie nemá a poskytuje nám porovnatelné výsledky s prvými dvoma postupmi.

Výpočet koeficientov pomocou MKP už realizovali viacerí autori a s touto situáciou sa vysporiadali rôznymi spôsobmi. Najrozšíahlejšie práce z tejto oblasti uverejnili Schajer, Manning a Flaman. Rozdiely medzi numerickými riešeniami sú spôsobené druhom numerického vyhodnotenia deformácie. Kým Schajer predpokladal deformáciu konštantnú pozdĺž základne tenzometra, Manning uvažoval s premenlivou deformáciou po dĺžke tenzometra.

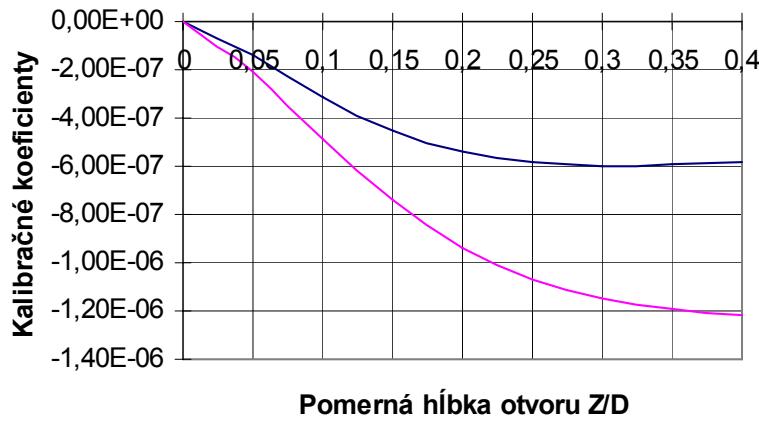
Postup č. 3 navrhnutý pre priechodný otvor možno bez obmedzení použiť aj v prípade slepého otvoru. Tento postup berie do úvahy celé pole pomernej deformácie, ktoré sníma mriežka tenzometra. To znamená že uvažuje s premenlivou deformáciou v obidvoch smeroch snímača.

Pre ružicu RY21 možno týmto spôsobom určiť hodnotu koeficientov \bar{A} a \bar{B} pre jednotlivé odvŕtané hĺbky. Pomocou modelu znázorneného na obr. 6 získame hodnoty zvyškových pomerých deformácií pre daný snímač v jednotlivých hĺbkach a určíme pomocou postupu č.3 hodnoty koeficientov.



Obr.6 Pole napäti po odvŕtaní niekoľkých vrstiev

Tabuľka 2 obsahuje hodnoty takto získaných koeficientov pre jednotlivé hĺbky odvŕtaného materiálu. Obr.7 znázorňuje priebeh týchto koeficientov v závislosti od pomeru Z/D.

Obr.7 Priebeh kalibračných koeficientov \bar{A} (modrá) a \bar{B} (ružová) pre ružicu RY21**Koeficienty \bar{A} a \bar{B} pre ružicu RY21** **Tabuľka 2**

Z/D	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
$\bar{A} [\text{MPa}^{-1}] \cdot 10^{-7}$	0,00	-1,388	-3,115	-4,517	-5,396	-5,829	-5,966	-5,935	-5,831
$\bar{B} [\text{MPa}^{-1}] \cdot 10^{-7}$	0,00	-2,08	-4,864	-7,433	-9,378	-10,69	-11,49	-11,95	-12,18

Aby sme mohli použiť ružicu pre ľubovoľný otvor je potrebné určiť hodnoty koeficientov pre rôzne veľkosti otvoru, aby z týchto hodnôt mohli byť príslušné koeficienty interpolované.

V súčasnej norme ASTM E837-01 sa namiesto koeficientov \bar{A} a \bar{B} používajú materiálovovo nezávislé koeficienty \bar{a} a \bar{b} .

Tabuľky 3 až 6 obsahujú hodnoty koeficientov \bar{a} a \bar{b} pre ružice RY21 a RY61 od firmy HBM.

Koeficienty \bar{a} pre ružicu RY21 **Tabuľka 3**

Z/D	D ₀ /D						
	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,05	0,011	0,017	0,024	0,033	0,045	0,059	0,077
0,10	0,024	0,038	0,055	0,076	0,101	0,131	0,168
0,15	0,036	0,056	0,081	0,110	0,146	0,188	0,236
0,20	0,043	0,068	0,098	0,133	0,174	0,221	0,274
0,25	0,048	0,074	0,107	0,145	0,188	0,237	0,291
0,30	0,049	0,077	0,110	0,149	0,193	0,242	0,295
0,35	0,049	0,077	0,110	0,148	0,192	0,240	0,292
0,40	0,048	0,075	0,108	0,146	0,188	0,236	0,288

Koeficienty \bar{b} pre ružicu RY21

Z/D	D ₀ /D						
	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,05	0,023	0,035	0,050	0,067	0,087	0,112	0,141
0,10	0,055	0,084	0,118	0,158	0,204	0,258	0,319
0,15	0,085	0,130	0,183	0,244	0,312	0,389	0,471
0,20	0,109	0,167	0,234	0,310	0,394	0,484	0,577
0,25	0,126	0,193	0,270	0,356	0,449	0,546	0,643
0,30	0,137	0,210	0,293	0,385	0,483	0,583	0,682
0,35	0,143	0,220	0,306	0,402	0,502	0,604	0,703
0,40	0,145	0,224	0,313	0,410	0,511	0,614	0,713

Tabuľka 4**Koeficienty \bar{a} pre ružicu RY61**

Z/D	D ₀ /D						
	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,05	0,012	0,019	0,027	0,038	0,051	0,068	0,090
0,10	0,027	0,042	0,061	0,084	0,112	0,147	0,188
0,15	0,039	0,061	0,089	0,121	0,159	0,204	0,255
0,20	0,047	0,074	0,106	0,144	0,187	0,236	0,290
0,25	0,052	0,080	0,115	0,155	0,200	0,251	0,305
0,30	0,053	0,082	0,118	0,158	0,204	0,255	0,309
0,35	0,053	0,082	0,117	0,158	0,203	0,253	0,308
0,40	0,052	0,081	0,116	0,156	0,201	0,250	0,304

Tabuľka 5**Koeficienty \bar{b} pre ružicu RY61**

Z/D	D ₀ /D						
	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,05	0,026	0,040	0,056	0,076	0,099	0,127	0,162
0,10	0,062	0,094	0,132	0,177	0,228	0,288	0,355
0,15	0,095	0,144	0,202	0,268	0,342	0,423	0,508
0,20	0,121	0,184	0,256	0,337	0,425	0,517	0,610
0,25	0,139	0,211	0,293	0,384	0,480	0,578	0,674
0,30	0,151	0,228	0,316	0,412	0,513	0,614	0,711
0,35	0,157	0,237	0,330	0,429	0,533	0,635	0,733
0,40	0,160	0,242	0,336	0,438	0,543	0,646	0,744

Tabuľka 6

Tieto koeficienty môžu byť priamo použité na výpočet zvyškových napäťí a sú zakomponované do programu na určovanie zvyškových napäťí, ktorý sa vyvíja na Katedre aplikovanej mechaniky a mechatroniky na Technickej univerzite v Košiciach.

ZÁVER

Znalosť zvyškových napäťí je dôležitá napríklad pre presné určenie únavovej životnosti alebo pre spevnenie súčiastky. Odstránenie zvyškových napäťí môže byť veľmi nákladné a niekedy je jednoduchšie určiť ich vplyv na únosnosť prvku. Vo väčšine prípadov je vzhľadom k pôvodu vzniku obtiažne určiť zvyškové napäťia analyticky. Z tohto dôvodu sú experimentálne metódy určovania zvyškových napäťí i dnes stále veľmi dôležité.

Autori ďakujú Vedeckej grantovej agentúre MŠ SR za podporu v rámci riešenia projektu č.1/2187/05.

LITERATÚRA

- [1] ASTM Standard E837-01 , norma USA pre meranie zvyškových napäťí
- [2] FLAMAN,M.T., MANNING,B.H.: *Determination of Residual Stress Variation with Depth by the Hole-Drilling Method*, Experimental Mechanics, No. 25,1985
- [3] MANNING, B. W., FLAMAN,M. T.: *Finite-Element Calculations of Calibration Constans for Determination of Residual Stresses with Depth by the Hole-Drilling Method*. Ontario Hydro (Research Division) Report 82-88-K, Toronto, Canada, 1982
- [4] LU, J.: *Handbook of measurement of residual stresses*. Society for experimental mechanics, Fairmont press Liburn, GA, 1996, Chapter 2
- [5] SENKO, P.: *Verifikácia určovania zvyškových napäťí v závislosti na hĺbke odvrtávania*. DDP TU v Košiciach, September 2005
- [6] SENKO, P.: *Modelovanie metódy odvrtávania pomocou MKP*, Novus Scientia 2004, Elfa Košice 2004, ISBN 80-8073-174-8
- [7] SCHAJER, G. S.: *Application of finite element calculations to residual stress measurements*. Journal of engineering materials and technology, Transaction, ASME, 103, April 1981, 157-163
- [8] TREBUŇA, F., SENKO, P., ŠARGA, P.: *How is applied hole-drilling method to determination of residual stresses in SR.*, Experimentální analýza napäťí 2005, 43nd International conference, 95-96, Skalský dvur, 2005, ISBN 80-214-2941-0
- [9] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F.: *Kvantifikácia zvyškových napäťí tenzometrickými metódami*. Grafotlač, Prešov, 2005, 134 str., ISBN 80-8073-227-2
- [10] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F., BOCKO, J., TREBUŇA, P., SENKO, P., ŠARGA, P.: *Ako dalej s využitím "Štandardnej" metódy pre určovanie zvyškových napäťí odvrtavaním*, Acta Mechanica Slovaca, 7, No. 4, 2003, 155-162, ISSN 1335-2393
- [11] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F., BOCKO, J., TREBUŇA, P., SENKO, P., ŠARGA, P.: *Is it possible to consider "standard" method of determination of residual stresses by hole-drilling to be definitive?*, In: Experimentální analýza napäťí 2004 : 42nd International conference, Plzeň : Škoda výskum s.r.o, 2004, 281-284, ISBN 80-239-2964-X
- [12] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F.: *Odolnosť prvkov mechanických sústav*. Košice, Emilena, 2004, 980 str., ISBN 80-8073-148-9
- [13] HOLÝ, S., DOUBRAVA, K., VÁCLAVÍK, J., VÍTEK, K., WEINBERG, O.: *Residual Stress Determination in Forging of Railway Axles with Two Different Heat Treatment – Určení velikosti zbytkových prutov v výkovoch železničných náprav s rozdielnym zpracovaním*. In: proc 40th International Conference on Experimental Stress Analysis, CTU-FME Praha, 2002, p. 105-108