

# E xperimentální A nalýza N apětí

## 2004

### TEPELNÁ CHYBA PŘI MĚŘENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ ODVRTÁVACÍ TENZOMETRICKOU METODOU

### THERMAL ERROR IN THE MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES BY THE HOLE-DRILLING STRAIN GAUGE METHOD

Milan Honner<sup>1</sup>, Michal Švantner<sup>2</sup>, Pavel Litoš<sup>3</sup>

*The contribution is devoted to thermal errors related to the hole-drilling strain gauge method for residual stress measurement. Temperatures and induced strains are experimentally determined during drilling. Real and apparent thermal strain are evaluated by computer simulation. Effect of various parameters of the hole-drilling method on the evolution and values of thermal strains are discussed. Results are generalized in the form of criterion equation.*

**Keywords** residual stress measurement, hole-drilling method, thermal strain.

**Klíčová slova** měření zbytkových napětí, odvrtávací metoda, tepelná deformace.

## 1. Úvod

Odvrtávací tenzometrická metoda [1], [2] je často používanou metodou pro měření zbytkových napětí. Je založena na vyvrtání malého otvoru do povrchu měřeného materiálu a tenzometrickém měření uvolněné deformace. Otvor je odvrtáván postupně po krocích a v každém kroku je po ukončení vrtání s určitým časovým odstupem tenzometricky měřena deformace. Z naměřených deformací se následně vyhodnocuje hloubkový profil zbytkových napětí.

Předmětem výzkumu v oblasti měření zbytkových napětí na pracovišti autorů je vliv různých parametrů odvrtávací metody [3], [4]. V příspěvku je pozornost zaměřena na vliv tepelných procesů, protože proces odvrtávání způsobuje ohřev měřeného vzorku [5]. Použití tenzometrů k měření deformací proto vyžaduje uvažovat jejich tepelné chyby, které nejsou v použitém můstkovém zapojení kompenzovány. Tepelná chyba měření se zde skládá ze dvou složek. První je skutečná tepelná deformace způsobená teplotní roztažností vzorku a jeho dynamickým teplotním polem. Druhou je zdánlivá tepelná deformace (tepelný výstup tenzometru) způsobená ohřevem tenzometru. Příspěvek shrnuje podstatné výsledky měření a počítačového modelování teplot a tepelných deformací odvrtávaných vzorků.

---

<sup>1</sup> Ing. Milan Honner, Ph.D.: Nové technologie - výzkumné centrum, Západočeská univerzita v Plzni; Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, Česká republika, tel.: +420377421088; e-mail: mhonner@seznam.cz

<sup>2</sup> Ing. Michal Švantner: Nové technologie - výzkumné centrum, Západočeská univerzita v Plzni; Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, Česká republika, tel.: +420377422102; e-mail: michal.svantner@email.cz

<sup>3</sup> Ing. Pavel Litoš: Nové technologie - výzkumné centrum, Západočeská univerzita v Plzni; Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, Česká republika, tel.: +420377421088; e-mail: litos@centrum.cz

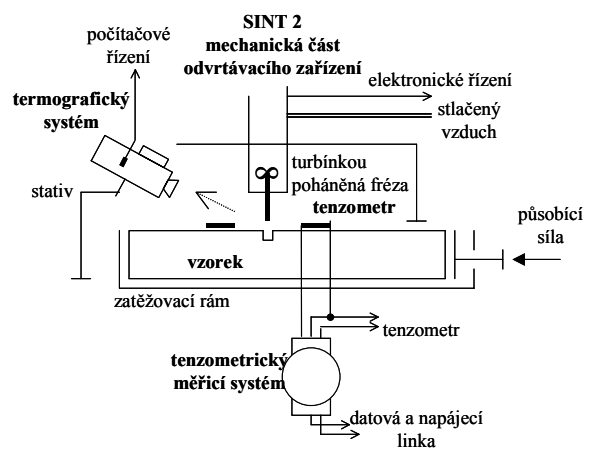
## 2. Termovizní a tenzometrická měření

Termografie se ukazuje jako vhodná metoda pro výzkum ohřevu vzorku s tenzometry i nástroje. Umožňuje bezkontaktně měřit dynamické teplotní pole v úzké oblasti v okolí odvrátvaného otvoru a neovlivňuje přitom tenzometrické měření. Podrobnosti o termografické analýze odvrátvací metody jsou uvedeny v [5].

Provedené experimenty sestávaly z termovizního měření teplotního pole nástroje a vzorku v okolí otvoru při postupném odvrátvání (obr.1). V několika případech byl experiment rozšířen o současné měření deformací v okolí odvrátvaného otvoru pomocí tenzometrických růžic. Použití termovize vyžadovalo provést zjištění emisivity povrchu vzorků, tenzometrů a nástroje. Zjišťován byl i vliv napájecího napětí tenzometrického můstku na odporový ohřev tenzometrů.



(a)

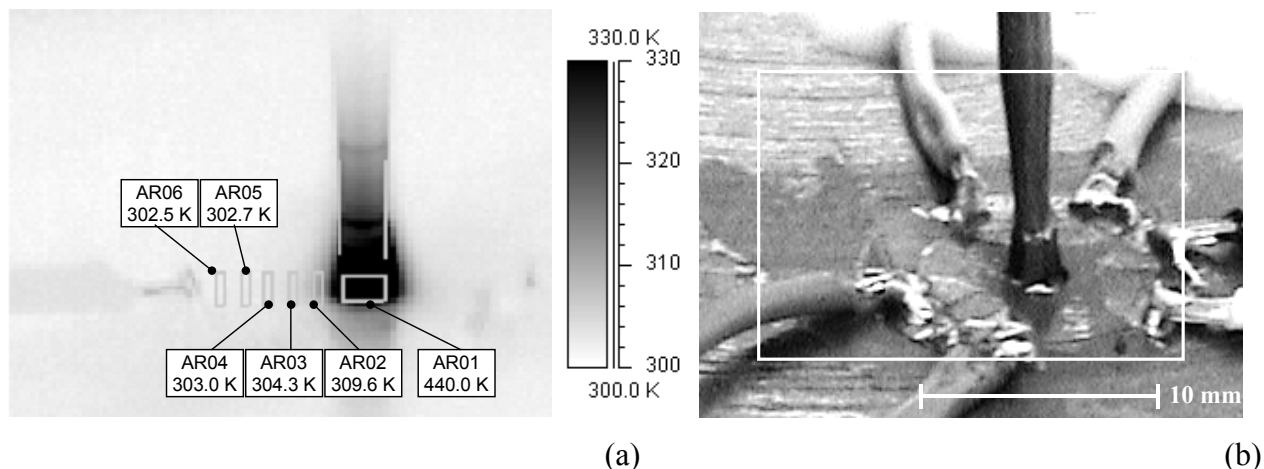


(b)

Obr.1: Termografické měření odvrátvání - (a) foto odvrátvacího zařízení a termovizní kamery, (b) schematické uspořádání s tenzometrickým měřením

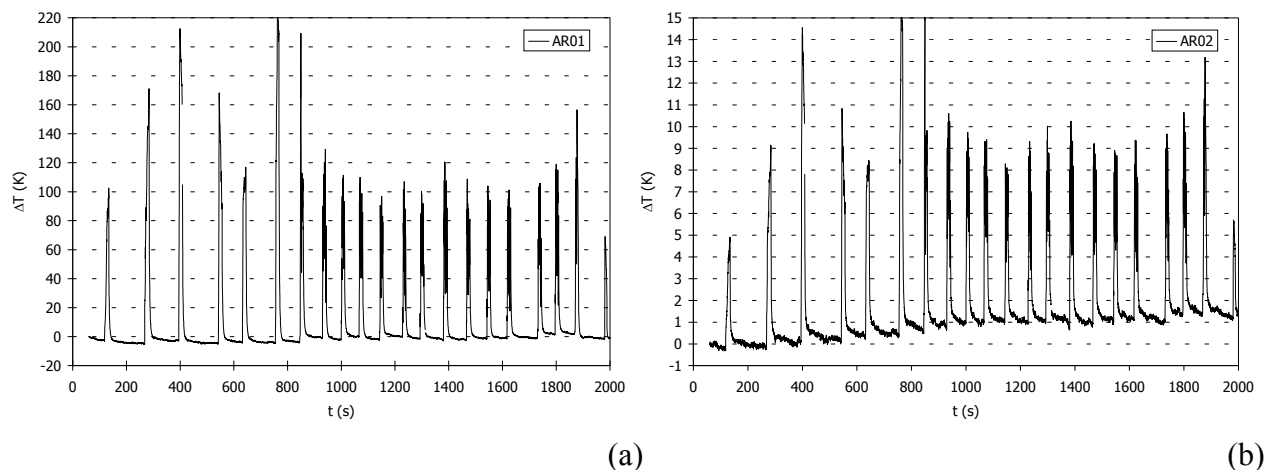
Experimenty byly provedeny na ocelových vzorcích rozměrů 50×50×7 mm pomocí odvrátvacího zařízení SINT MTS3000, uvolněná deformace měřena tenzometricky (růžice pro měření zbytkových napětí HBM 1,5/120RY61S). Pro odvrátvání byly použity wolfram-karbidové čelní válcové frézy o poloměru cca. 0,8 mm poháněné vzduchovou turbínkou. Teplotní měření byla zabezpečována termovizním systémem FLIR ThermoCAM SC2000 vybaveným mikroskopickým objektivem.

Průběh teploty během odvrátvání závisí na materiálu měřeného vzorku a podmínkách odvrátvání zejména opotřebení nástroje. Bylo zjištěno (obr.2, obr.3), že nástroj se během odvrátvání ohřeje o více než 100 K, zatímco vzorek pouze o několik K. Teplota v okolí otvoru je tedy dostatečně nízká, že lze při použití neopotřebovaného nástroje téměř vyloučit ovlivnění zbytkových napětí snížením meze plasticity a relaxačními procesy způsobenými zvýšenou teplotou.

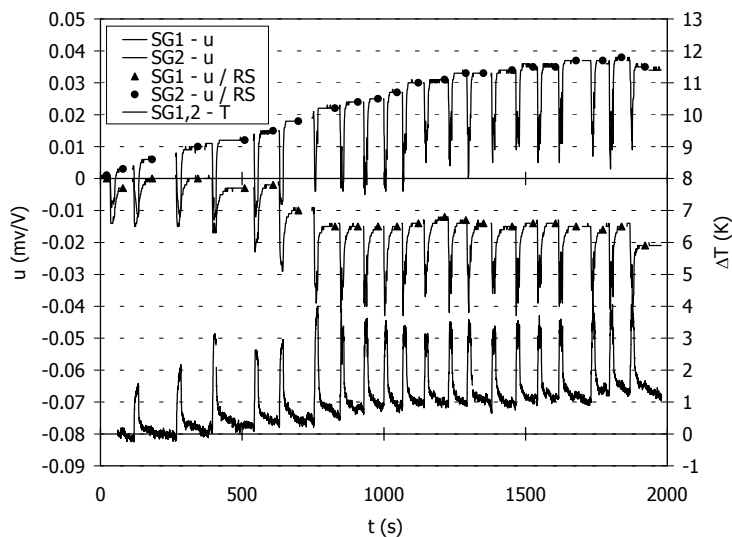


Obr.2: Teplotní pole nástroje, tenzometru a vzorku v čase 776 s postupného odvrtávání -  
 - (a) termogram, (b) foto

Zvýšení teploty vzorku během jednoho odvrtávacího kroku způsobuje měřenou skutečnou a zdánlivou tepelnou deformaci, jejíž hodnota je porovnatelná s uvolněnou deformací (obr.4). Rychlost poklesu teploty po ukončení odvrtávání vyžaduje vyčkat více než 30 s (ovlivněno velikostí vzorku a jeho tepelnými vlastnostmi) k dosažení rovnoměrné teploty ve vzorku. Pak lze zaznamenat uvolněné deformace pro vyhodnocení zbytkových napětí. Přestože dále již není v měřených deformacích po odvrtání patrný vliv poklesu chybových tepelných deformací, jsou uvolněné deformace ovlivněny postupným růstem rovnoměrné teploty vzorku. Odstranění tohoto vlivu může vyžadovat vyčkat se záznamem uvolněných deformací až několik minut po odvrtání dalšího přírůstku otvoru a to v závislosti na velikosti vzorku a intenzitě odvodu tepla z povrchu.



Obr.3: Průběh teploty nástroje a vzorku při postupném odvrtávání - (a) nástroj - AR01(Obr.2),  
 (b) vzorek - AR02(Obr.2)



Obr.4: Výstup tenzometrického můstku (SGi-u) a teplota tenzometru (SGi-T) během postupného odvrtávání vzorku

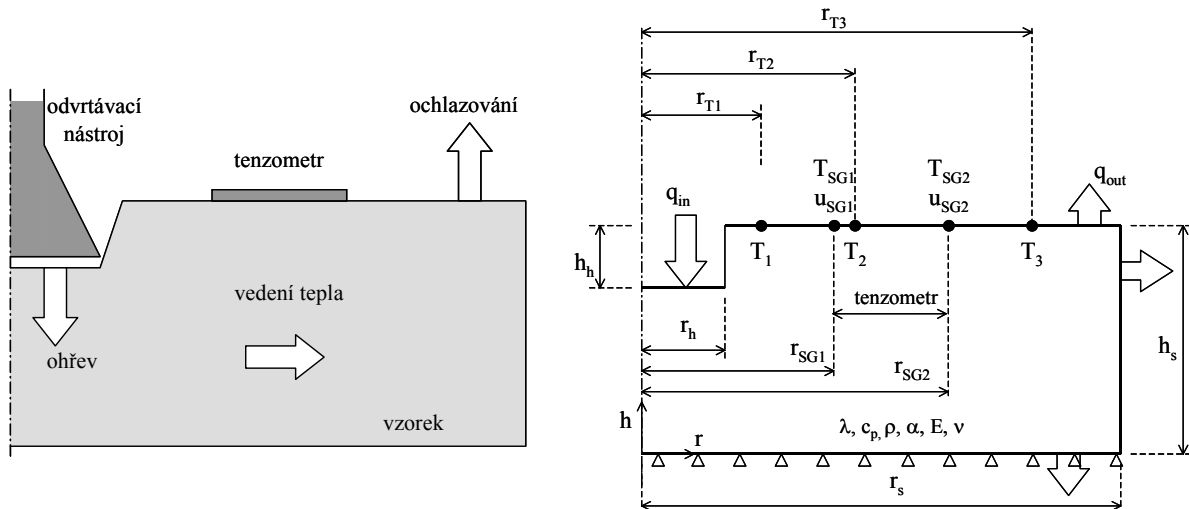
### 3. Počítačová simulace termomechanického procesu

Výsledky termovizního měření povrchové teploty vzorků při odvrtávání byly následně využity k určení tepelných toků z nástroje do vzorku během vrtání a po jeho ukončení. Na vytvořeném modelu byl simulován ohřev vzorků a analyzována vznikající skutečná a zdánlivá tepelná deformace. Použití počítačové simulace umožnilo zjistit vliv jednotlivých parametrů odvrtávací metody na velikost tepelné chyby při měření uvolněné deformace. Podrobnosti o počítačové simulaci termomechanického procesu ve vzorcích při odvrtávání lze nalézt v [6], [7].

Model (obr.5) uvažoval rotačně symetrický tvar vzorku, jehož osa je shodná s osou odvrtávacího nástroje, s parametry výškou a poloměrem vzorku, hloubkou a poloměrem otvoru, velikostí a polohou tenzometru. Z procesů ve vzorku byl uvažován tepelný tok z nástroje do vzorku, vedení tepla vzorkem, přestup tepla z jeho povrchu do okolí a tepelná deformace vzorku.

Počítačový simulační model byl vytvořen v MKP výpočetním systému COSMOS/M využitím skriptů (souborů s parametrickým vyjádřením instrukcí) a programovacího jazyka systému. Efektivním způsobem tak mohly být opakovaně řešeny podobné úlohy. Při řešení nepřímé úlohy vyhodnocení tepelného toku z nástroje byla hledána shoda povrchové teploty vzorku s výsledky termovizního měření v několika vzdálenostech od okraje otvoru. Výsledkem řešení přímých termomechanických úloh byly zejména časové průběhy teplotního pole ve vzorku a způsobená skutečná deformace a dále průběh teploty tenzometru a vyvolaná zdánlivá tepelná deformace.

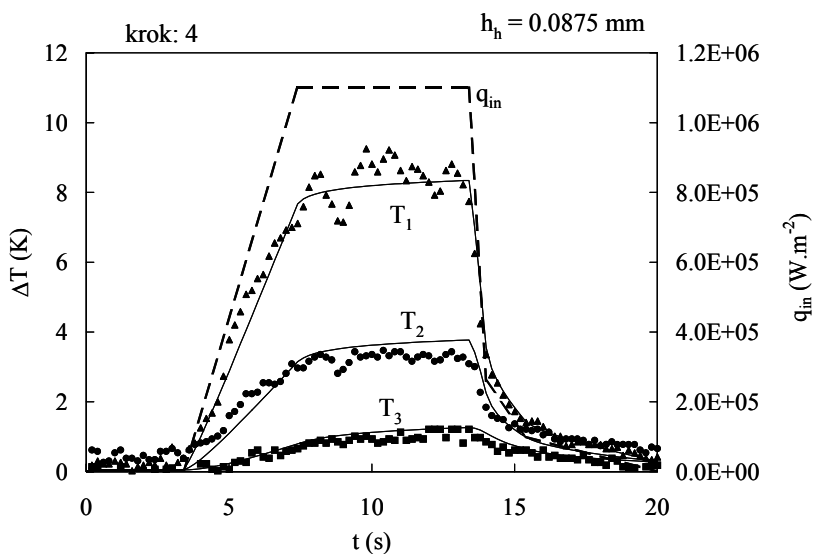
Výsledky časových průběhů tepelného toku z nástroje do vzorku (obr.6) zjištěných pro jednotlivé odvrtávací kroky mohou být zobecněny a vyjádřeny časovou křivkou skládající se ze tří částí. První část vyjadřující začátek záběru nástroje je charakterizována lineárním nárůstem tepelného toku na maximální hodnotu. Druhá část je konstatní s hodnotou okolo  $1,1 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ , její délka se liší pro jednotlivé odvrtávací kroky v závislosti na tom, za jak dlouho je odvrtávací zařízení schopno odvrtat stejný přírůstek hloubky otvoru. Třetí část křivky vyjadřuje mocninou funkci pokles toku z maximální hodnoty po ukončení odvrtávání.



Obr.5: Schematické uspořádání modelu pro simulaci skutečné a zdánlivé tepelné deformace vzorku při odvrtávání

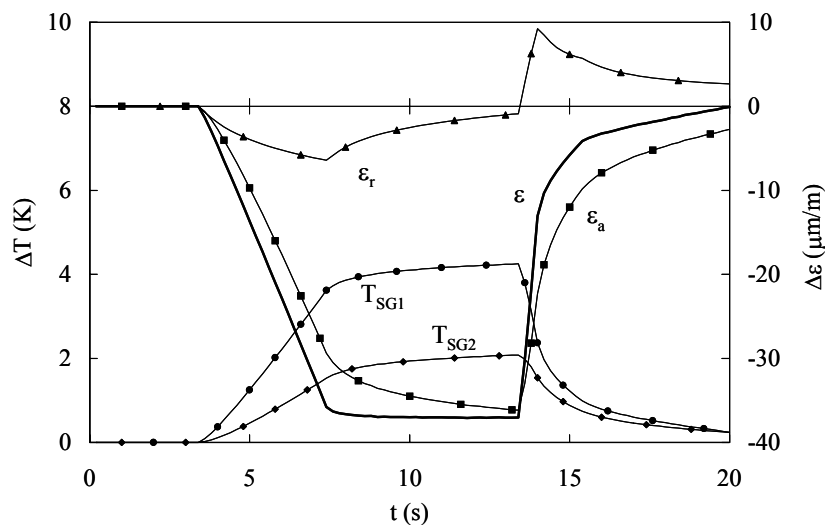
Tab.1: Parametry modelu odpovídající měřeným vzorkům

vzorek		proces odvrtávání		tenzometrické měření (1.5/120RYG1S)	
$r_s$	75 mm	$r_h$	0.9 mm	$r_{SG1}$	2.55 mm
$h_s$	20 mm	$h_{h,min}$	0.025 mm	$r_{SG2}$	2.55 mm
$\lambda$	54.4 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$h_{h,max}$	0.375 mm	$\alpha_{SG}$	$10.8 \times 10^{-6} K^{-1}$
$c_p$	448 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$\alpha_C$	10 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	$k_1$	-12.6 -
$\rho$	7850 $kg \cdot m^{-3}$	$T_A$	298 K	$k_2$	1.42 $K^{-1}$
$T_0$	299 K	měření teploty		$k_3$	$-4.58 \times 10^{-2} K^{-2}$
$\alpha$	$11.1 \times 10^{-6} K^{-1}$	$r_{T1}$	1 mm	$k_4$	$2.06 \times 10^{-4} K^{-3}$
$E$	206 GPa	$r_{T2}$	2 mm		
$\nu$	0.28	$r_{T3}$	5 mm		

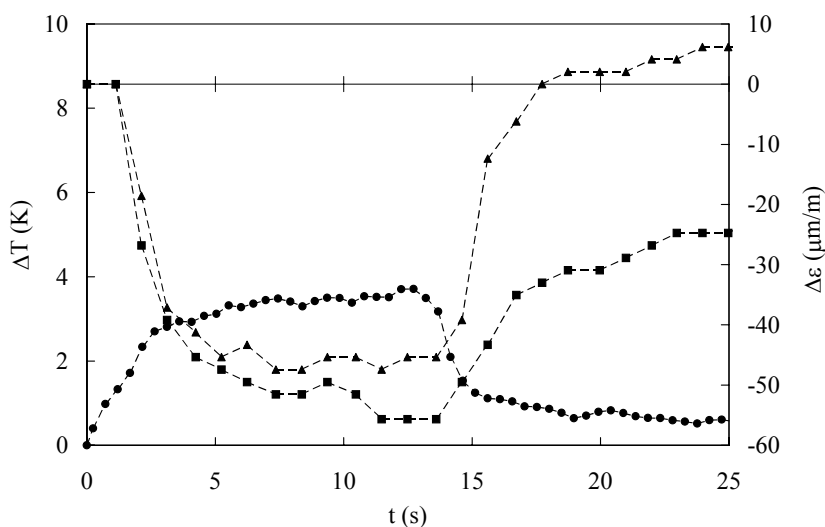


Obr. 6: Porovnání měření a simulované teploty na povrchu vzorku ( $T_1, T_2, T_3$ ) a tepelný tok z nástroje do vzorku v průběhu jednoho odvrtávacího kroku

Teplota povrchu vzorku v oblasti tenzometru se liší v závislosti na čase a na vzdálenosti od okraje otvoru. Maximální nárůst průměrné teploty tenzometru během jednoho odvrtávacího kroku byl přibližně 3 K. Tento malý nárůst teploty tenzometru způsobuje vznik maximální zdánlivé tepelné deformace  $-35 \mu\text{m/m}$  (tlak). Její časový průběh (obr.7) sleduje průběh teploty tenzometru. Po ukončení odvrtávání teplota tenzometru (a tedy i zdánlivá tepelné deformace) klesá cca 6 s na rovnoměrnou teplotu v celém vzorku. Tato rovnoměrná teplota vzorku odvrtáním jednoho přírůstku otvoru vzroste o 0,25 K a její pokles na původní hodnotu je pomalý.



Obr. 7: Teplota tenzometru ( $T_{SG1}$ ,  $T_{SG2}$ ), skutečná, zdánlivá a celková deformace ( $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon$ ) v průběhu jednoho odvrtávacího kroku - simulace



Obr. 8: Teplota tenzometru ( $T_{SG}$ ) a celková deformace ( $\epsilon_1^*$ ,  $\epsilon_2^*$ ) v průběhu jednoho odvrtávacího kroku - měření

Odlišný průběh má skutečná tepelná deformace vzorku (obr.7), která je ovlivněna teplotním polem vzorku. Časový průběh lze rozdělit do čtyř navazujících částí. První odráží relativně rychlý nárůst teploty po začátku odvrtávání. Na konci této části dosahuje deformace tlakového maxima  $-7 \mu\text{m/m}$ . Druhá část je charakterizována postupným poklesem a končí současně s ukončením odvrtávání. Třetí část související s poklesem teploty trvá pouze 0,6 s, při níž deformace náhle přechází do tahového maxima  $10 \mu\text{m/m}$ . Ve čtvrté části pak deformace postupně klesá.

Uvedené průběhy a hodnoty veličin byly zjištěny na modelu měřených vzorků (tab.1). Výsledná deformace (výstup tenzometru) je v modelu tvořena součtem skutečné a zdánlivé deformace. Protože jsou jejich hodnoty po ukončení odvrtávání opačné, výsledkem je rychlejší pokles celkové tepelné deformace než jejich složek. Porovnání výsledků simulace s naměřenou deformací při odvrtávání, kde se uplatňuje i uvolněná deformace (obr.8), ukazuje dobrou shodu.

#### 4. Experimentální matematický model

Fyzikální a rozměrovou analýzou procesů byla vytvořena bezrozměrová kritéria vyjadřující vliv jednotlivých působících parametrů metody. Pomocí vytvořeného programového vybavení pro automatizovanou tvorbu výpočetních modelů byla simulována řada alternativ odvrtávání. Výsledky byly zobecněny pomocí experimentálního matematického modelu ve tvaru bezrozměrové kritériální rovnice. Podrobnosti jsou uvedeny v [8].

Náhodně bylo vygenerováno 200 variant odvrtávání lišících se tepelným tokem z nástroje do vzorku, délkou odvrtávání, výškou a poloměrem vzorku, hloubkou otvoru, tepelnou vodivostí, kapacitou a roztažností materiálu vzorku, časem po ukončení odvrtávání. Počítačovou simulací byly zjištěny jim odpovídající skutečné a zdánlivé tepelné deformace.

Jednotlivé parametry byly vyjádřeny pomocí bezrozměrových kritérií (tab.2). Z nich byla vytvořena kritériální rovnice. Její neznámé koeficienty jsou určeny metodou nejmenších čtverců ve vztahu k výsledkům numerického experimentu. Určují vliv příslušného kritéria na skutečnou a zdánlivou tepelnou deformaci. Zjištěné hodnoty koeficientů a výsledky statistické analýzy jsou uvedeny v tab.3.

Tab.2: Definice bezrozměrových kritérií a tvar kritériální rovnice pro ohřev a deformaci vzorku při odvrtávání

rozměrové veličiny		
$c_p \rho$	tepelná kapacita	(J.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup> )
$h_h, h_s$	hloubka otvoru, výška vzorku	(m)
$r_h, r_s$	poloměr otvoru, vzorku	(m)
$q_d$	tepelný tok z nástroje	(W.m <sup>-2</sup> )
$T_{ref}$	počáteční teplota	(K)
$\alpha$	teplotní roztažnost	(K <sup>-1</sup> )
$\varepsilon_a, \varepsilon_r, \varepsilon_{ref}$	deformace zdánlivá, skutečná, referenční	(-)
$\lambda$	tepelná vodivost	(W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
$\tau_d, \tau_y$	doba vrtání, od ukončení vrtání	(s)
bezrozměrové veličiny		
$K_{1m} = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_{ref}}, K_{2m} = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{ref}}, R_s = \frac{r_s}{r_h}, H_h = \frac{h_h}{r_h}, H_s = \frac{h_s}{r_h},$ $Fo = \frac{\lambda(\tau_d + \tau_y)}{c_p \rho r_h^2}, M_q = \frac{q_d \tau_d}{c_p \rho T_{ref} r_h}, K_\alpha = \frac{\alpha T_{ref}}{\varepsilon_{ref}}$		
kritériální rovnice		
$K_{jm} = k_j R_s^{a_j} H_h^{b_j} H_s^{c_j} Fo^{d_j} M_q^{e_j} K_\alpha^{f_j}$		
$k_j, a_j, b_j, c_j, d_j, e_j, f_j$ ... hledané koeficienty		
$j = 1$ ... skutečná deformace, $j = 2$ ... zdánlivá deformace		

Tab.3: Zjištěné hodnoty koeficientů kritériální rovnice a výsledky statistické analýzy

		K <sub>1m</sub> regrese (skutečná deformace)		K <sub>2m</sub> regrese (zdánlivá deformace)	
koeficient	odpovídající kritérium	hodnota	t-test	hodnota	t-test
ln (k)	-	1.256	3.335	10.056	19.280
a	R <sub>s</sub>	-0.758	-15.830	-0.558	-8.407
b	H <sub>h</sub>	0.092	3.275	-0.003	-0.078
c	H <sub>s</sub>	-0.451	-13.155	-0.430	-9.045
d	F <sub>o</sub>	-1.204	-24.984	-1.490	-22.326
e	M <sub>q</sub>	1.194	35.078	1.285	27.274
f	K <sub>α</sub>	1.060	37.283	0.073	1.862
determinační koeficient		0.939		0.840	
F - faktor		495.083		169.649	

Zdánlivá tepelná deformace (tepelný výstup tenzometru) má ve většině případů větší důležitost než skutečná tepelná deformace vzorku. Rozměry vzorku podstatně ovlivňují vznik uvažovaných deformací a jejich význam z pohledu tepelné chyby měření uvolněné deformace roste s zmenšováním velikosti vzorku. Kvalita nástroje, parametry vrtání, tepelná kapacita a vodivost vzorku a čas od ukončení vrtání mají na proces podstatný vliv. Tepelná roztažnost ovlivňuje pouze vznik skutečné tepelné deformace. Vliv hloubky otvoru je velmi malý.

## 5. Závěry

Uvedený příspěvek je shrnutím prací, které byly na pracovišti autorů provedeny při výzkumu tepelné chyby při měření zbytkových napětí odvrtávací tenzometrickou metodou. Bylo zjištěno, že tepelná deformace může být podstatným zdrojem chyb pokud není uvažována.

## Poděkování

Tento článek vznikl za finančního přispění MŠMT v rámci projektu výzkumu a vývoje LN00B084.

## Literatura

- [1] Jian Lu (ed.): *Handbook of Measurement of Residual Stresses*, Society for Experimental Mechanics, The Fairmont Press, Inc., Lilburn, 1996
- [2] Grant P.V., Lord J.D., Whitehead P.S: *The Measurement of Residual Stress by the Incremental Hole Drilling Technique*, National Physical Laboratory, Teddington, 2002
- [3] Švantner M., Litoš Pa, Honner M. Some problems of residual stress measurement by hole drilling method. In *Proceedings of NTC*. 1s edition. Pilsen: UWB NTC, 2003. pp. 59-65



- [4] Švantner M., Litoš Pa., Honner M., Kříž A. Parametry měření odvrtávací metody zjišťování zbytkových napětí (Hole-drilling residual stress method parameters determination). In *Proceedings of EAN2003*, pp. 99-100.
- [5] Honner M., Litoš P., Švantner M.: Thermography analyses of the hole-drilling residual stress measurement technics, *Infrared Physics & Technology*, Vol.45, pp.131-142, 2004
- [6] Litoš P., Švantner M., Honner M., Simulace ohřevu materiálu při měření zbytkových napětí odvrtávací metodou *20. uživatelská konference COSMOS 2003*. Praha 2003, pp. 2-61 – 2-68
- [7] Litoš P., Švantner M., Honner M., Simulation of thermal strain effect at the hole drilling residual stress measuring technique, *Journal of Strain Analysis* (zasláno)
- [8] Švantner M., Litoš P., Honner M.: Hole drilling residual stress measurement method-the drilling thermal influence, *Journal of Engineering Materials and Technology* (zasláno)