

Experimentální Analýza Napětí 2007

EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL DETERMINATION OF CONSTANTS FOR HOLE DRILLING METHOD

EXPERIMENTÁLNÍ A VÝPOČTOVÁ KALIBRACE KOEFICIENTŮ UŽÍVANÝCH PŘI VYHODNOCOVÁNÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ METODOU ODVRTÁNÍ OTVORU

Stanislav Holý¹, Jiří Jankovec², Jaroslav Václavík², Otakar Weinberg², Petr Jaroš³

Abstract: The hole-drilling strain-gauge method measures residual stresses near the surface of the material. The method involves attached strain gauge rosette to the surface, drilling a hole in the geometric centre of the gauge rosette and measuring the relieved strains. The measured strains are then related to relieved principal stresses through a series of equations using dimensionless constants \bar{a}, \bar{b} . This method is a basic of ASTM E837 [1] standard for residual stress determination, which involves the constants \bar{a}, \bar{b} obtained by FEA simulations. In the presented work the experimental set-up is described for deriving of these constants for uniaxial uniform stress field and obtained results of experimental calibration are discussed. The constants are derived using proposed method for several strain gauge rosettes and are compared with those, obtained by FEA model. One example of using the hole-drilling method for non-uniform stress field is presented to show the limits of ASTM standard. As an alternative, the results evaluated from Schajer [4] integral method are presented and discussed, focused especially on separation of surface machining stresses.

Keywords: residual stresses, hole-drilling method, experimental calibration, FEA calculation.

1. Úvod

Zbytková napětí mohou být přítomna ve výrobku, aniž by byl v provozu nebo byl podroben externímu zatížení. Nejběžnější příčinou vzniku zbytkových napětí jsou výrobní procedury, jako je odlévání, svařování, obrábění, tváření, tepelné zpracování aj. Zbytková napětí mohou být rovněž zavedena do výrobku až v důsledku provozního namáhání či montáže. Identifikace přítomnosti zbytkového napětí je velmi důležitá pro určení životnosti nebo zbytkové životnosti výrobku. Zvláště kladná zbytková napětí jsou významné faktory zvyšující únavové poškození a podporující vznik dalších strukturních defektů. Záporná zbytková napětí mohou v některých případech být kladným faktorem, zejména co se únavy týče. V mnoha případech je měření zbytkových napětí používáno pro kontrolu technologie výroby a to buď přímo (kontrola maximálních dovolených napětí, zavedených při výrobě, měření velikosti zbytkových napětí, úmyslně zavedených při kuličkování nebo válečkování) a nebo nepřímo (kontrola zbytkových napětí ve středu masivních výkovek a odlitků, zavedených při odlévání a kování prostřednictvím měření povrchových zbytkových napětí).

Mezi nejrozšířenější metody měření zbytkového napětí patří metoda odvrtání otvoru [3]. Metoda spočívá v umístění speciální, většinou tříprvkové pravoúhlé tenzometrické růžice na

¹ Ing. Stanislav Holý, CSc., Prof., ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Technická 4, 166 07 Praha, e-mail: stanislav.holy@fs.cvut.cz

² Ing. Jiří Jankovec, Ing. Jaroslav Václavík, Ing. Otakar Weinberg, ŠKODA VÝZKUM s.r.o., Dynamická zkušebna, Tylova 57, 316 00 Plzeň, e-mail: otakar.weinberg@skodavyzkum.cz

³ Ing. Petr Jaroš, CSc., Techlab s.r.o., Sokolovská 207, 190 00 Praha, e-mail: techlab@czn.cz

povrch předmětu, vyvrtání otvoru do středu růžice a měření uvolněných poměrných deformací na jednotlivých tenzometrech růžice $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$. Naměřené deformace jsou pak svázány se zbytkovým napětím v hlavních směrech známými vztahy pomocí bezrozměrných, na materiálu téměř nezávislých, konstant \bar{a}, \bar{b} . Tato metoda je základem standardu ASTM E837 [1].

Konstanty \bar{a}, \bar{b} jsou ve standardu odvozeny pro základní rozměrové parametry – normalizovanou hloubku vrtání z/D a normalizovaný průměr otvoru D_0/D pro tři určité geometrie tenzometrických růžic. Zde je D_0 skutečný průměr vrtaného otvoru, z je skutečná hloubka vrtání a D je střední průměr tenzometrické růžice (vedený středem mřížky tenzometru).

Metodika, použitá ve standardu pro určování zbytkových napětí je platná pouze za předpokladu, že napětí jsou rovnoměrně rozdělena po hloubce odvrtávaného materiálu. Ve standardu jsou uvedeny tabulky konstant \bar{a}, \bar{b} pro osm vrtaných normalizovaných hloubek. Zbytková napětí, vypočtená v těchto hloubkách, musí odpovídat charakteristickému tvaru uvolněných poměrných deformací pro případ rovnoměrné napjatosti po hloubce. Tyto závislosti mají charakteristický průběh v závislosti na z/D ; jejich tvar je modifikován pouze normalizovaným průměrem růžice D_0/D . Zbytkové napětí je pak počítáno jako střední napětí v tloušťce materiálu $0,4D$ od povrchu pomocí metody mocninných řad; pro výpočet se využívají hodnoty uvolněných poměrných deformací ve všech odvrtaných hloubkách.

Cílem presentované práce je experimentální a výpočtové (MKP) odvození konstant \bar{a}, \bar{b} zejména pro typy tenzometrických růžic, nezahrnutých v ASTM E837, vyráběné firmou Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) a jejich porovnání s konstantami, danými ve standardu.

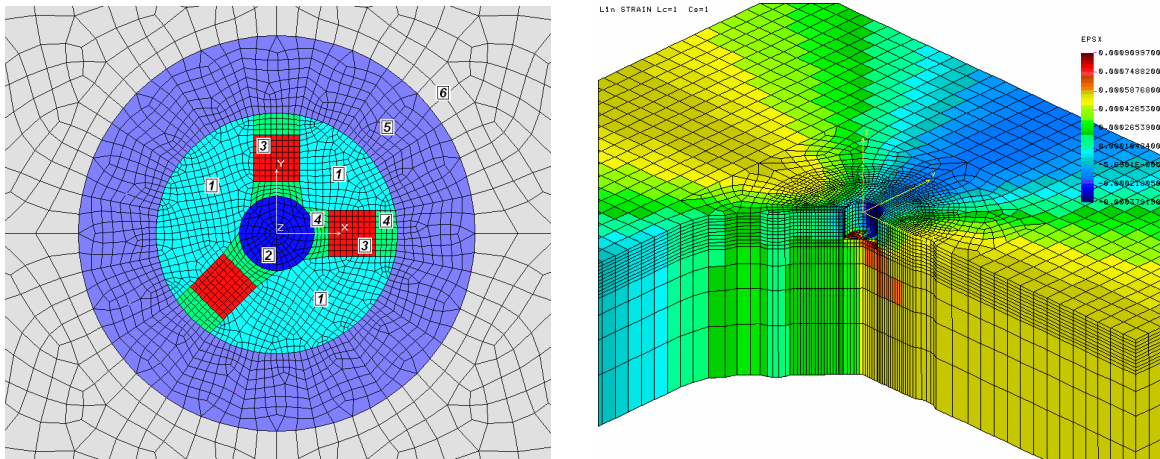
Ve druhé části této práce je na příkladu uvedeno vyhodnocení zbytkového napětí ve výkovku rozměrného turbinového rotoru, kde jsou zbytková napětí přítomna po odlévání a kování a mohou být stabilizována řízeným chladnutím a tepelným zpracováním. Napětí na povrchu rotoru od tepelného zpracování v malé odvrtávané hloubce je možno považovat za rovnoměrné, pokud se zde nevyskytují jako v prezentovaném případě zbytková napětí od dalšího opracování povrchu, viz Holý et al.[2]. Pro vyhodnocení je zde použita integrální metoda, kterou odvodil Schajer [4] a je provedeno její porovnání s metodou mocninných řad, používanou ve standardu ASTM E837.

2. Modelování metody odvrtání otvoru pomocí MKP

MKP simulace byly provedeny použitím PC-verze MKP-software COSMOS/M, ver. 2.9. Pro pre- i post-processing byl využit modul GeoStar programu COSMOS. Analyzovanou oblastí byl kvádr o rozměrech $100 \times 77 \times 24$ mm (délka, šířka, výška). Jeden konec tohoto kvádru byl vetknut a druhý byl zatížen silou 225 kN (zadána působením tahového napětí na ploše zatěžovaného konce kvádru) působící ve směru osy vzorku. Ve středu horní plochy vzorku je odvrtáván otvor. MKP síť řešeného problému byla vytvořena parametricky za využití makro jazyka programu COSMOS/M, aby bylo možno vyšetřovat vliv různých parametrů geometrie úlohy. Struktura MKP sítě umožnila postupné odebrání materiálu v místě odvrtávaného otvoru (odstraňováním prvků). Skutečná geometrie jednotlivých tenzometrů byla při tvorbě MKP sítě rovněž zohledněna. Proces tvorby MKP sítě sestával ze dvou hlavních kroků:

- tvorba 2D sítě – byly vytvořeny oblasti odvrtávané díry a tenzometrů
- tvorba 3D sítě – tažením existující 2D sítě byla vytvořena objemová síť, přitom délka inkrementu pro tažení odpovídala inkrementu odvrtané hloubky.

Na obr. 1 a) jsou barevně rozlišeny sítě jednotlivých oblastí. Oblast č. 1 je oblast nacházející se mezi tenzometry, oblast č. 2 je oblast odvrátaného otvoru, č. 3 je oblast tenzometru, č. 4 je oblast napojující tenzometry k oblastem č. 2 a č. 5. (oblasti, kde vzrůstá velikost MKP prvků). Některé z těchto oblastí (č. 1, č. 2, č. 5, č. 6) jsou nasíťovány automatickou síťovací procedurou (se specifikovaným parametrem – základní velikost sítě) a další oblasti jsou nasíťovány pomocí parametrického síťování (oblast č. 3 a č. 4). Počet prvků na hranách parametricky síťovaných oblastí je vypočten na základě velikosti prvků na sousedící hranici oblasti, která byla síťována automaticky. Typ použitých elementů z knihovny programu COSMOS/M je SOLID (8-mi uzlový objemový element se třemi posuvnými stupni volnosti na jeden uzel). Použitý integrační typ těchto prvků je defaultní 8-mi uzlový hybridní element – tzv. *displacement and stress-based (mixed)* formulace ($2 \times 2 \times 2$ integrační body). Pro řešení lineární elastické úlohy byl použit iterační PCG-řešič. Výsledkem těchto simulací byly průměrné poměrné deformace z vláken virtuálních tenzometrů každého z tenzometrů. Tyto hodnoty byly dále použity pro výpočet kalibračních koeficientů. Pro ilustraci jsou na Obr. b) zobrazeny radiální poměrné deformace v jednotlivých elementech na konci odvrátání.



Obr. 1. MKP síť a mapa radiální poměrné deformace kolem odvrátaného otvoru

Výpočet byl realizován pro typy tenzometrických růžic VISHAY 125RE, HBM RY21 a HBM RY61. Výsledkem výpočtu byly řady uvolněných poměrných deformací ε_1 , ε_2 , ε_3 pro dané odvrátané hloubky a pro daný průměr vrtného otvoru. Byly použity stejné přírůstky hloubky z/D a průměru otvoru D_0/D obdobně jako ve ASTM E837. Navíc byl výpočet proveden pro shodné průměry otvoru a hloubky, které byly použity při experimentální kalibraci; tyto hodnoty jsou rovněž standardně používány při servisních měřeních. Vyhodnocení koeficientů \bar{a} , \bar{b} bylo provedeno pro každou odvrátanou vrstvu dle vztahů,

$$\bar{a} = -\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{(1 + \mu) \cdot \varepsilon_{\max}}, \quad \bar{b} = -\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_{\max}}. \quad (1)$$

Výsledné série vyhodnocených koeficientů pomocí MKP jsou uvedeny v tab. 1. až tab. 3. Koeficienty se pro dané rozměrové parametry, ale pro jiné typy růžic, navzájem liší. Je vidět rozdíl mezi vypočtenými hodnotami pro růžici VISHAY 125RE a hodnotami, uvedenými v ASTM E837. Rozdíl se zvyšuje s parametrem průměru otvoru D_0/D . Důvodem zřejmě bude, že výpočet ASTM koeficientů byl proveden spíše pro střed tenzometrů růžice, než za pomoci integrace uvolněného pole poměrné deformace podél mřížky tenzometru. Vysvětlení této domněnky lze najít na obr. 2. Zde je vykreslen průběh hodnot obou konstant nad mřížkou tenzometru růžice v rastru 8 bodů v radiálním směru \times 9 bodů v tangenciálním směru, za předpokladu, že se vyhodnocení provedlo pro bod rastru (číslování bodů rastru v radiálním

směru roste se zvětšující se vzdáleností od středu otvoru). Je vidět značná nelinearita vykreslené plochy zvláště pro koeficient \bar{b} týče, která vzrůstá směrem ke středu otvoru.

125RE	\bar{a}					\bar{b}				
Hloubka	Průměr otvoru D_0/D					Průměr otvoru D_0/D				
z/D	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,05	0,025	0,034	0,046	0,060	0,080	0,045	0,061	0,081	0,104	0,133
0,10	0,055	0,076	0,101	0,132	0,169	0,106	0,143	0,186	0,235	0,294
0,15	0,080	0,110	0,144	0,184	0,231	0,162	0,217	0,279	0,346	0,421
0,20	0,096	0,131	0,170	0,215	0,264	0,205	0,272	0,345	0,423	0,505
0,25	0,105	0,141	0,182	0,228	0,278	0,234	0,308	0,388	0,471	0,556
0,30	0,107	0,144	0,186	0,232	0,282	0,252	0,330	0,414	0,500	0,585
0,35	0,107	0,144	0,185	0,231	0,280	0,261	0,343	0,428	0,515	0,600
0,40	0,105	0,141	0,182	0,227	0,275	0,266	0,348	0,435	0,522	0,608
Průchozí	0,085	0,116	0,152	0,192	0,237	0,232	0,308	0,390	0,473	0,555

Tab. 1. Koeficienty \bar{a} , \bar{b} pro tenzometrickou růžici VISHAY 125RE

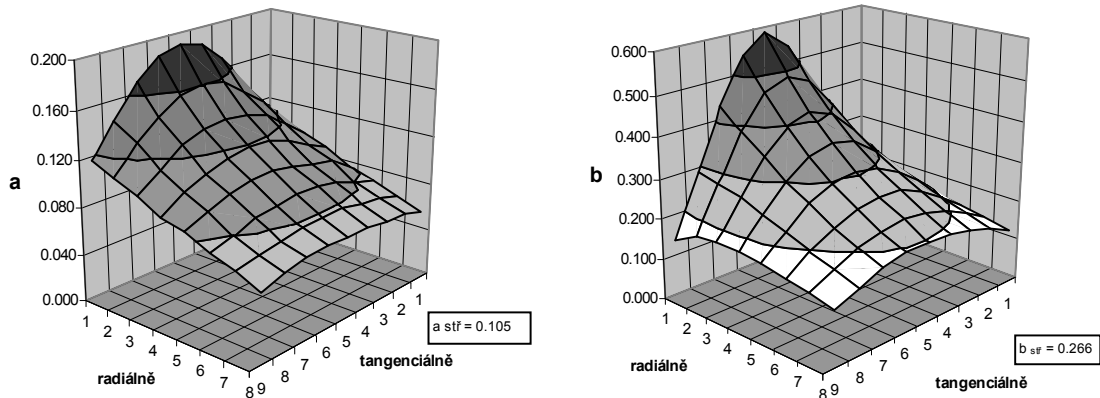
RY21	\bar{a}					\bar{b}				
Hloubka	Průměr otvoru D_0/D					Průměr otvoru D_0/D				
z/D	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,05	0,025	0,033	0,045	0,060	0,078	0,049	0,065	0,087	0,111	0,140
0,10	0,056	0,075	0,101	0,133	0,170	0,116	0,154	0,202	0,258	0,318
0,15	0,082	0,110	0,147	0,190	0,238	0,180	0,238	0,309	0,388	0,471
0,20	0,099	0,133	0,176	0,225	0,277	0,231	0,304	0,390	0,483	0,577
0,25	0,109	0,145	0,190	0,241	0,295	0,267	0,349	0,444	0,545	0,643
0,30	0,112	0,149	0,195	0,246	0,299	0,290	0,377	0,478	0,583	0,682
0,35	0,112	0,149	0,194	0,244	0,297	0,303	0,393	0,497	0,604	0,703
0,40	0,110	0,146	0,191	0,240	0,291	0,309	0,402	0,507	0,615	0,714
Průchozí	0,090	0,123	0,160	0,204	0,252	0,280	0,410	0,521	0,577	0,675

Tab. 2. Koeficienty \bar{a} , \bar{b} pro tenzometrickou růžici HBM RY21

RY61	\bar{a}					\bar{b}				
Hloubka	Průměr otvoru D_0/D					Průměr otvoru D_0/D				
z/D	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,05	0,027	0,038	0,051	0,067	0,089	0,055	0,074	0,097	0,125	0,159
0,10	0,061	0,084	0,112	0,145	0,187	0,129	0,174	0,225	0,283	0,351
0,15	0,088	0,121	0,159	0,203	0,254	0,198	0,265	0,339	0,418	0,504
0,20	0,106	0,145	0,188	0,235	0,290	0,252	0,334	0,421	0,512	0,606
0,25	0,115	0,156	0,201	0,250	0,305	0,288	0,380	0,476	0,573	0,670
0,30	0,118	0,160	0,205	0,254	0,309	0,311	0,409	0,509	0,609	0,708
0,35	0,118	0,160	0,205	0,253	0,308	0,325	0,426	0,529	0,631	0,729
0,40	0,116	0,157	0,201	0,249	0,304	0,332	0,435	0,540	0,642	0,741
Průchozí	0,094	0,130	0,168	0,212	0,263	0,307	0,407	0,511	0,614	0,714

Tab. 3. Koeficienty \bar{a} , \bar{b} pro tenzometrickou růžici HBM RY61

Vypočtené hodnoty koeficientů za použití integrace poměrné deformace podél aktivní části tenzometru dávají hodnoty $\bar{a} = 0,099$, $\bar{b} = 0,205$, zatímco odpovídající hodnoty, stanovené pro střed mřížky tenzometru vychází $\bar{a} = 0,105$, $\bar{b} = 0,266$. V normě ASTM jsou uvedeny následující hodnoty $\bar{a} = 0,101$, $\bar{b} = 0,227$. Z obr. 2. je rovněž zřejmé, jak je důležitá pro přesnost stanovení koeficientů a tedy i pro výslednou hodnotu zbytkového napětí, je přesné stanovení rozměrových parametrů, vstupujících do výpočtu.

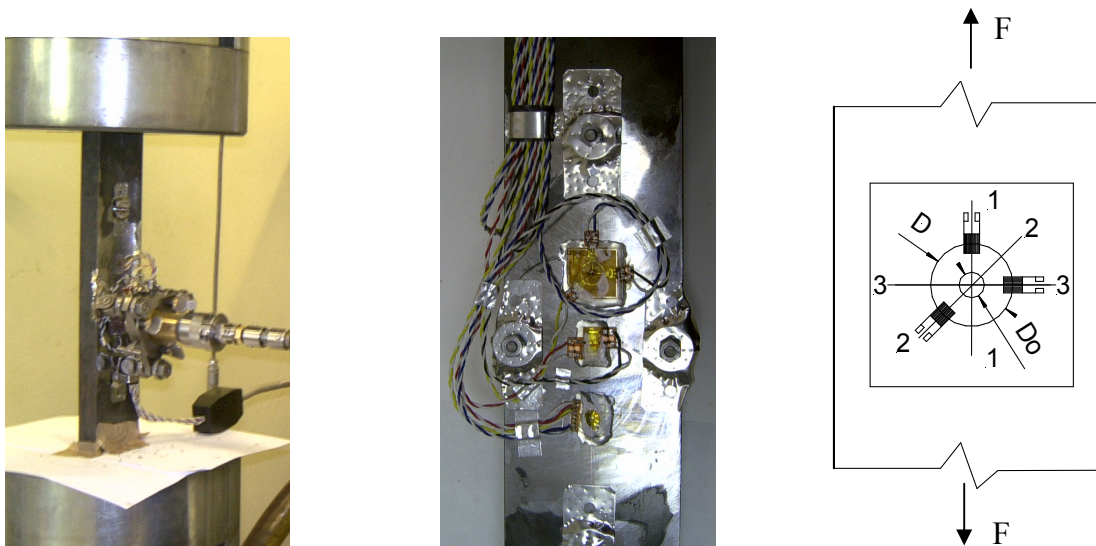


Obr. 2. Průběh koeficientů \bar{a}, \bar{b} podél mřížky růžice VISHAY 125RE; $z/D = 0,2$, $D_0/D = 0,3$

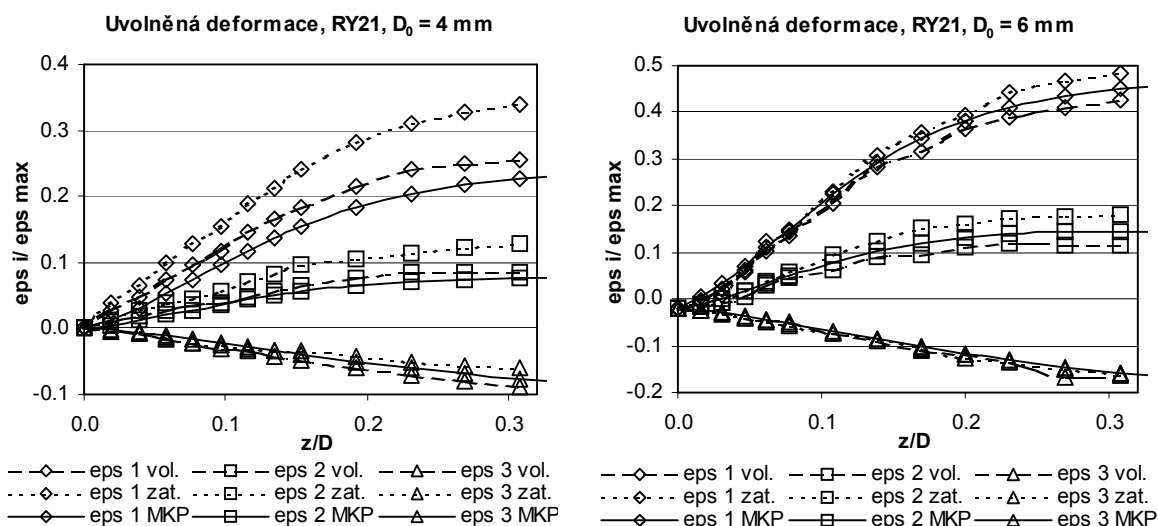
3. Experimentální kalibrace

Kalibrace koeficientů \bar{a}, \bar{b} byla provedena pro tři shora zmíněné tenzometrické růžice na zkušební vzorku, zatíženém jednosým tahovým napětím. Byly použity vzorky o průřezu 77×24 mm a délce 259 mm, zhotovené z uhlíkové oceli ČSN 11 500 o mezi kluzu $R_p = 285$ MPa a mezi pevnosti $R_m = 470-610$ MPa (max. obsah uhlíku 0,38%). Povrch vzorku byl před zkouškou broušen a vzorek byl žihán na odstranění zbytkových napětí. Růžice byly nalepeny lepidlem VISHAY M-Bond AE10 s vytvrzením do teploty 60°C . Všechny vzorky byly jednoosově zatěžovány v zatěžovacím hydraulickém rámu Schenck 400 kN tahovou silou $F = 225$ kN, odpovídající tahovému napětí 122 MPa. Orientace tenzometrické růžice byla dle obr. 3. Tenzometr č. 1 byl ustaven paralelně se směrem zatěžovací síly. Odvrtávání otvoru bylo provedeno vlastním přípravkem, shodným se standardně vyráběným VISHAY RS200 bez toho, aby se vzorek snímal ze zatěžovacího stroje. Byla použita speciální dvoubřitá excentrická fréza ze slinutého karbidu. Pro minimalizaci pasivních odporů byl otvor předvrtán $\varnothing 0,8$ mm pro vrtání frézou $\varnothing 1,5$ mm a $\varnothing 2$ mm pro vrtání frézami $\varnothing 4$ a $\varnothing 6$ mm.

Podle ASTM E837 má být vrtání při kalibraci provedeno na nezatíženém vzorku. Ve skutečné měřené součásti je však většinou přítomno nějaké zbytkové napětí. Proto bylo rozhodnuto provést kalibraci vždy dvakrát, jednou s vrtáním do nezatíženého vzorku a podruhé při vrtání do vzorku pod napětím. V obou případech byl vzorek nejprve zatížen osovou silou bez vrtání otvoru za účelem určení hlavních deformací ε_{max} , ε_{min} a určení Poissonova čísla μ . Při prvním typu kalibrace byl vzorek vrtán při nezatíženém vzorku. Po zatížení vzorku silou $F = 225$ kN byly odečteny poměrné deformace. Uvolněná poměrná deformace byla určena jako rozdíl měřené deformace po každém kroku vrtání minus hodnota deformace zatíženého vzorku bez otvoru. V případě druhého typu kalibrace byl otvor postupně vrtán přímo do zatíženého vzorku bez jeho odlehčování. Uvolněná deformace byla počítána přímo jako rozdíl deformace po a před vrtáním otvoru. Příklad typického průběhu uvolněných poměrných deformací pro růžici HBM RY21 vrtané ve volném a zatíženém stavu frézou o průměru 4 mm a 6 mm je uveden na obr. 4, kde je provedeno porovnání s hodnotami, získanými pomocí MKP.



Obr. 3. Sestava pro experimentální kalibraci

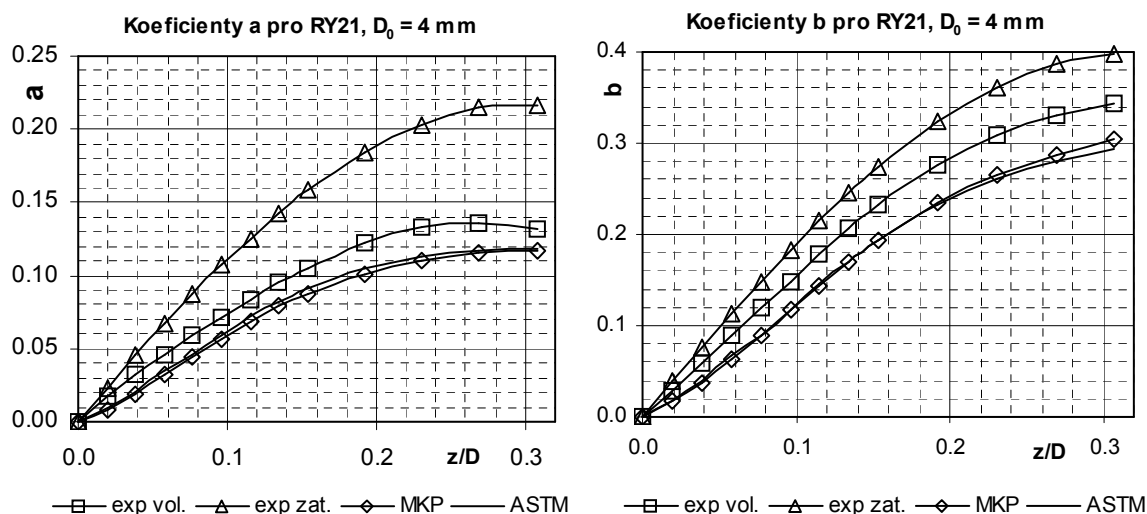


Obr. 4. Uvolněné relativní poměrné deformace pro tenzometrickou růžici HBM RY21

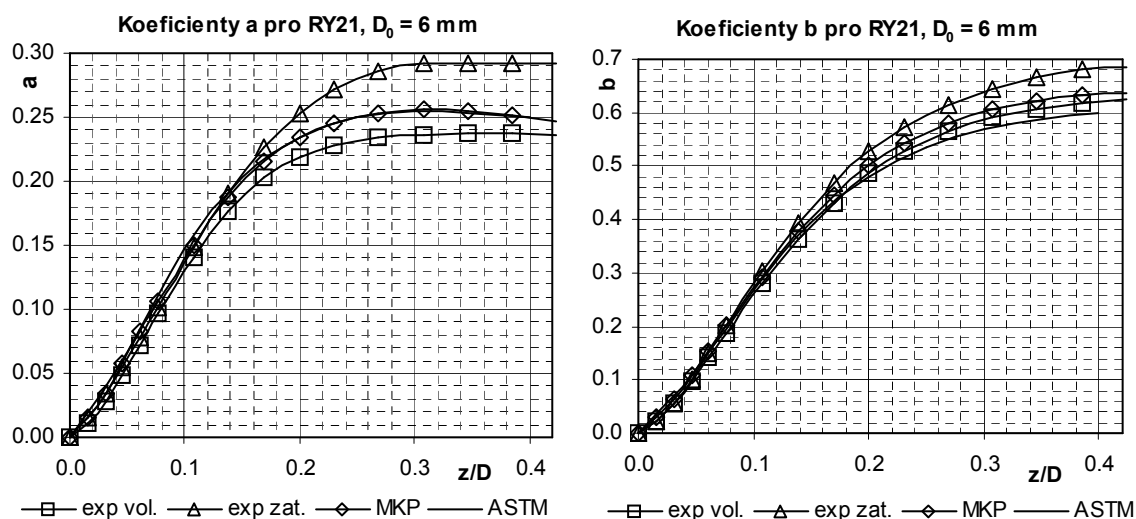
Z obrázku je zřejmá zjištěná skutečnost, že shoda mezi experimentem a výpočtem určenými hodnotami se zvyšuje se zvyšujícím se průměrem frézy. Druhým viditelným faktem je, že pro každý typ růžice je uvolněná poměrná deformace vyšší, když je vrtáno do zatíženého vzorku. Jedná se o vážnou skutečnost, která zavádí relativně vysokou systematickou chybu do vyhodnoceného zbytkového napětí. Nicméně vypočtená zbytková napětí jsou vždy vyšší než skutečně se vyskytující v součásti, pokud tato chyba není korigována. Tento zjištěný fenomén je možno připisovat mikroplastickým deformacím, objevujícím se na obvodu vrtaného otvoru v místech maximální koncentrace napětí. Získané průběhy uvolněných deformací pro růžici VISHAY 125 RE jsou obdobné s prezentovanými na obr. 4. Avšak uvolněné deformace pro malou růžici RY61, vrtanou frézou o průměru 1,5 mm, vykazují značný rozptyl a nestandardní průběh relaxační funkce. Tyto výsledky nejsou vhodné pro stanovení koeficientů. Lze konstatovat, že růžice o takovém malém průměru není vhodné použít pro klasické vrtání, protože do vzorku zavádí vysoké plastické deformace. Výsledky získané pro růžici RY61 zde proto nejsou prezentovány.

Koeficienty \bar{a}, \bar{b} byly z uvolněných poměrných deformací počítány opět dle vztahu (1). Příklad průběhu vypočtených koeficientů pro růžici HBM RY21 je ukázán na obr. 5. pro

průměr vrtaného otvoru $D_0 = 4$ mm a na obr. 6. pro průměr vrtaného otvoru $D_0 = 6$ mm. Křivky uvedené v grafech a byly vyhlazeny pomocí polynommické aproximace.



Obr.5. Koeficienty \bar{a}, \bar{b} pro tenzometrickou růžici HBM RY21 a vrtaný otvor $D_0 = 4$ mm



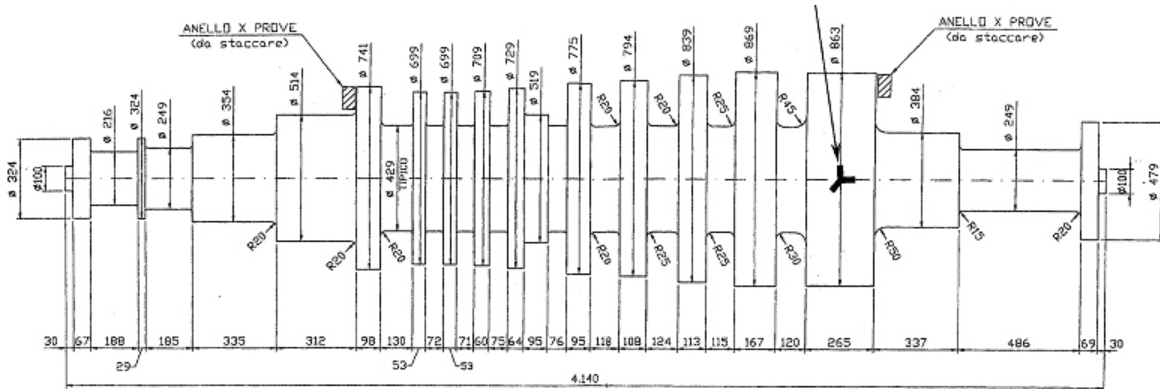
Obr. 6. Koeficienty \bar{a}, \bar{b} pro tenzometrickou růžici HBM RY21 a vrtaný otvor $D_0 = 6$ mm

4. Příklad měření zbytkového napětí na reálné součásti

Znalost vnitřních zbytkových napětí je velice důležitá pro masivní odlitky a výkovky, protože dává informaci o kvalitě výroby a použitém tepelném zpracování. Úroveň napjatosti ve středu výkovku je určována na základě měření povrchových zbytkových napětí, které mají charakteristický průběh a neměli by překročit dovolenou hodnotu, odpovídající povolenému napětí v jádře. Obvykle se jedná o hodnotu -60 MPa. Tato hodnota je dána na základě výpočtu MKP a odpovídá řádným podmínkám tepelného zpracování.

Avšak povrchová napětí jsou vždy ovlivněna technologickým napětím, vzniklým při mechanickém opracování, protože aplikace metody odvrtání otvoru na hrubé neopracované hřídeli je problematická. Vrstva ovlivněná obráběním sahá obvykle do hloubky cca 1 až 2 mm, takže je snaha měřit zbytková napětí nejméně 2 mm pod povrchem. V dalším je uveden příklad měření podpovrchových napětí velkého výkovku za použití dvou přístupů: metody ASTM a Schajerovy integrální metody [4].

Zkoušenou součástí byl výkovek rotoru, zhotovený z vakuované oceli 27 NiCrMoV 15-6, zušlechtěné, opracované a normalizačně žíhané, viz obr. 7.



Obr. 7. Zkoušený turbínový rotor

Zbytková napětí byla měřena za užití speciální 2-břité excentrické frézy o průměru $D_0 = 4$ mm v místě, označeném na obr. 7. šipkou. Tenzometrická růžice HBM 3/120 RY21 s výrobcem udaným středním průměrem $D = 13$ mm byla přilepena lepidlem HBM Z70. Pro měření byl použit čtyřkanalový statický můstek HBM Manuel Kompensator v půlmůstkovém zapojení s kompenzačními tenzometry, umístěnými poblíž měřeného místa na hřídeli. Hřídel byla před měřením dvakrát soustružena. První tříška měla hloubku $t = 2,5$ mm, posuv nástroje byl $s = 0,5$ mm·ot⁻¹, druhá tříška měla hloubku $t = 1$ mm, posuv nástroje byl $s = 0,5$ mm·ot⁻¹ za použití kruhové destičky ze slinutého karbidu o poloměru $R = 5$ mm.

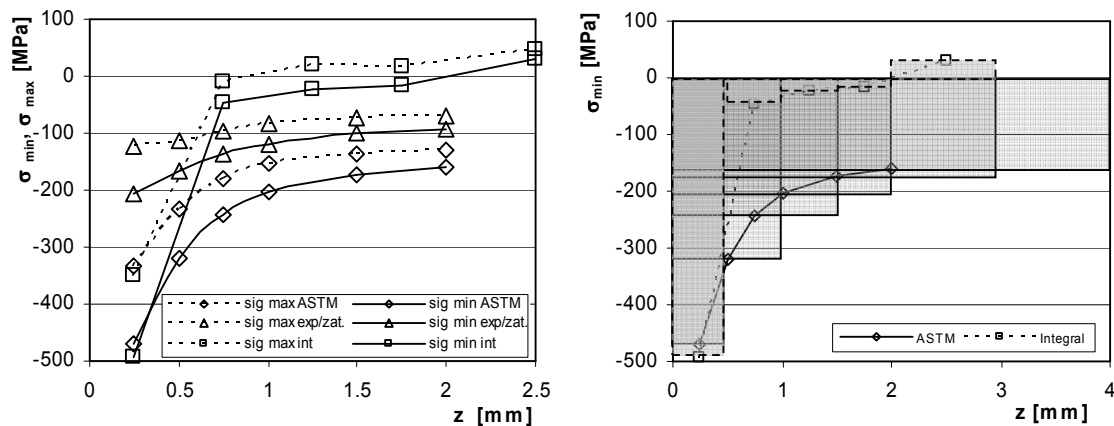
Naměřené poměrné deformace pro jednotlivé odvrtné hloubky jsou dány v tab. 4. V dalších sloupcích tab. 4. jsou uvedena vyhodnocená napětí v hlavních směrech.

z [mm]	Uvolněné poměrné deformace [$\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$]			Metoda mocninných řad, koeficienty dle				Integrální metoda	
				ASTM		Exp./zatížený			
	ε_1	ε_2	ε_3	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]	σ_{\max} [MPa]	σ_{\min} [MPa]
0,0	0	0	0	-	-	-	-	-	-
0,5	63	44	33	-334	-471	-124	-208	-351	-493
1,0	85	60	63	-234	-320	-113	-167	-10	-45
1,5	92	66	71	-181	-242	-96	-138	19	-22
2,0	95	69	77	-155	-204	-84	-119	16	-16
3,0	98	76	84	-138	-174	-74	-101	48	32
4,0	98	76	89	-130	-161	-69	-93	-	-

Tab. 4. Vyhodnocení zbytkových napětí v turbínovém rotoru

Nejprve jsou uvedeny výsledky získané metodou mocninných řad dle ASTM za použití koeficientů, vypočtených MKP, dále za použití koeficientů, získaných experimentálně při vrtání do zatíženého vzorku a nakonec jsou uvedeny výsledky, získané integrální metodou. Vypočtené hodnoty jsou vykresleny v grafu na obr. 8., kde vodorovná souřadnice odpovídá hloubce pod povrchem z.

Z tab. 4. a obr. 8. je zřejmý značný rozdíl mezi výsledky získané metodou mocninných řad podle ASTM a metodou integrální, umožňujícími vyhodnocení napětí po hloubce. Je rovněž vidět podstatný pokles vyhodnocených napětí, pokud se použijí koeficienty, experimentálně odvozené při vrtání do zatíženého vzorku. Porovnání minimálních hlavních napětí, vypočtených metodou mocninných řad (koeficienty ASTM) a integrální metodou, je znázorněno na obr. 8 b) jak čárovým, tak sloupcovým grafem. Napětí v odvrtávaných vrstvách je zobrazeno prostřednictvím sloupců. Metoda mocninných řad dle ASTM dává střední napětí od povrchu do vyvrtané hloubky z_i , viz tmavší sloupce; velmi hrubý odhad průběhu napětí po hloubce je zobrazen plnou čarou, jejíž pořadnice jsou vztaženy k poloviční vrtané hloubce. Integrální metoda dává střední napětí v každé odstraněné vrstvě (světlé sloupce), odhad průběhu napětí je dán přerušovanou čarou, jejíž pořadnice odpovídají středům těchto sloupců (odstraněných vrstev). Je zřejmé, že za použití metody mocninných řad dle ASTM není možno určit podpovrchová zbytková napětí. Dokonce i pro poslední odvrtanou vrstvu je střední vyhodnocené napětí ovlivněno povrchovým napětím, takže i zde leží zbytkové napětí nad dovolenou mezí. Za pomoci integrální metody je jasně detekováno, že vysoké tlakové napětí je přítomno pouze v první tenké povrchové vrstvě, ale již v hloubce pod 0,5 mm klesá hodnota zbytkového napětí na dovolenou mez (absolutní hodnota je nižší než požadovaných -60 MPa).



Obr. 8. Porovnání vyhodnocených zbytkových napětí v turbínovém rotoru za použití různých metod

6. Závěr

Popsanými postupy byly stanoveny koeficienty \bar{a}, \bar{b} pro metodu odvrtání otvoru pro v praxi nejrozšířenější tenzometrické růžice HBM RY21, HBM RY61 a VISHAY 125RE metodou konečných prvků a pomocí experimentu.

Realizované práce ukázaly, že konstanty získané experimentálně se liší od těch, získaných na základě metody konečných prvků, pokud je vrtání prováděno do zatíženého vzorku. Pro podmínky experimentu s poměrně vysokým tahovým napětím vycházejí hodnoty koeficientů vždy vyšší, což znamená, že vyhodnocená napětí podle experimentálně stanovených konstant budou vycházet vždy vyšší než skutečná. Je odhadováno, že tento efekt bude vzrůstat se vzrůstajícím poměrem σ_{nom}/R_p . Pro verifikaci účinku mikroplastických deformací je připravován experiment při jednoosé tlakové napjatosti.

Shoda mezi experimentem zjištěnými a výpočtem MKP stanovenými koeficienty je lepší pro zvyšující se průměr vrtaného otvoru. Bylo rovněž zjištěno, že odvrtání malých růžic jako je HBM RY61 klasickým postupem není zcela vhodné. Získaný profil uvolněných poměrných

deformací neodpovídá typickému tvaru a koeficienty, vypočtené na základě těchto deformací nedosahují očekávaných hodnot.

Omezení metody mocninných řad, použité ve standardu ASTM, bylo demonstrováno na měření zbytkového napětí, měnícího se po hloubce. Bylo však ukázáno, že pro tento případ lze úspěšně použít metodu integrální, kterou odvodil Schajer [4]

Poděkování: Tento příspěvek byl vytvořen v rámci projektů GA ČR 101/05/2523 a MPO FT-TA2-019, autoři děkují za poskytnutou podporu.

Literatura

- [1] ASTM E 837-01, *Standard Test Method for Hole-Drilling Strain Gage Method*, Amer.Soc. for Testing and Materials, 2002
- [2] Holý, S., Václavík, J. and Weinberg, O.: Residual Stress Determination as a Base for Evaluation of Machining Treatment, *Proceedings, 22nd Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics*, Parma, Italy, 2005
- [3] Rendler, N. J. and Vigness, I.: Hole-Drilling Strain-Gauge Method of Measuring Residual Stresses. *Experimental Mechanics* 6, No. 12, 1966
- [4] Schajer, G. S.: Measurement of Non-uniform residual stress using the hole-drilling method. *Journal of Engineering materials and technology*, Vol. 110, No. 4, Part 1: pp. 338-343, Part II: pp. 344-349, 1988