



APLIKACE VYBRANÝCH METOD PRO MĚŘENÍ ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ APPLICATION OF SOME METHODS FOR RESIDUAL STRESS MEASUREMENT

Jaroslav VÁCLAVÍK, Zbyněk BUNDA, Petr BOHDAN, Otakar WEINBERG

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň
Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra materiálu
a strojírenské metalurgie, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

Abstrakt

V článku jsou popsány některé semidestruktivní a nedestruktivní metody měření zbytkového napětí a jsou uvedeny příklady jejich aplikace se zaměřením na energetické strojírenství.

Klíčová slova

Zbytková napětí, odvrtávací metoda, ultrazvuková metoda

Abstract

Some semi- and non-destructive techniques are described in the article for residual stress measurements and examples of using them especially in power engineering are shown.

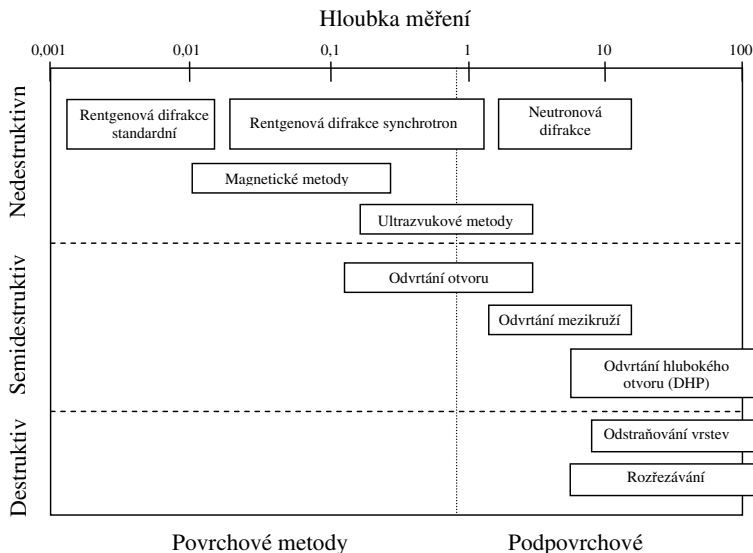
Key words

Residual stress, drilling method, ultrasound method

1. Úvod

Zbytková napětí (ZN) jsou vnášena do součástí během jejich výroby a dále se mohou přerodělovat během pozdějšího tepelného nebo mechanického zpracování nebo v průběhu provozního zatěžování. Spolehlivé stanovení původu zbytkových napětí v kombinaci s provozním namáháním je nezbytné pro stanovení jejich vlivu na životnost součástí. Přes rozšiřování výpočetních metod pro určování zbytkových napětí bude experiment vždy nezbytný pro jejich verifikaci. Metody pro měření zbytkových napětí je možno obecně rozdělit na destruktivní, semidestruktivní a nedestruktivní (obr. 1).

Destruktivní metody určování zbytkových napětí jsou založeny na změně napěťového stavu odstraněním části materiálu nebo rozřezáním součástí a měření deformace, odpovídající této změně, zatímco nedestruktivní metody využívají závislosti mezi fyzikální nebo krystalickou vlastností materiálu a zbytkovým napětím.



Obr. 1 Metody pro měření zbytkových napětí

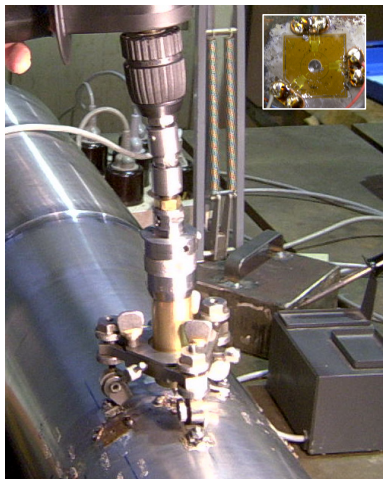
2. Vybrané metody měření zbytkového napětí

2. 1 Metoda odvrtání otvoru a mezikruží

Pro měření povrchových napětí jsou nejpoužívanějšími metody semidestruktivní. Relaxace napětí se měří pomocí na povrchu součásti nalepených odporových tenzometrů a dosahuje se odvrtáním otvoru (surface hole drilling) [1] nebo mezikruží (ring core) [2]. Speciálním případem je metoda „deep hole drilling“, kdy se do součásti vyvrtá nejdříve otvor a posléze mezikruží a měří se změna kruhovitosti otvoru po jeho celé délce.

Měření zbytkových napětí odvrtáním otvoru lze provádět podle standardu ASTM E837-08. Nová revize normy předepisuje postup jak pro měření homogenních napětí metodou mocninných koeficientů (power series), tak proměnlivých po hloubce metodou integrální [3]. Vlivem koncentrace relaxovaných napětí kolem vyvrtaného otvoru je použitelnost metody do 50% meze kluzu.

Při odvrtání mezikruží je zbytkové napětí určováno z relaxované poměrné deformace měřené tenzometrickou růžicí uprostřed zbylého sloupku. Výhodou metody je, že po odvrtání dostatečné hloubky dojde k úplné relaxaci zbytkového napětí; měří se tedy skutečná napětí neovlivněná koncentrátorem napětí jako v případě metody odvrtání otvoru. Metodu lze však využít i pro měření napětí po hloubce nebo v dané vrstvě pod povrchem při znalosti relaxačních koeficientů, stanovených MKP nebo experimentem [2]. Na obr. 2 a je zobrazeno zařízení pro odvrtání otvoru, používané ve VZÚ Plzeň s.r.o. do hloubky otvoru 4 mm, na obr. 2 b zařízení, používané pro odvrtání mezikruží pro průměr odvrtaného sloupku 14 mm. Na obr. 3 je vykreslen průběh změny relaxované poměrné deformace pro dva typy tenzometrických růžic a tři průměry odvrtaného otvoru a rovněž pro metodu ring core a růžici nalepenou kolem otvoru ring core („man“).



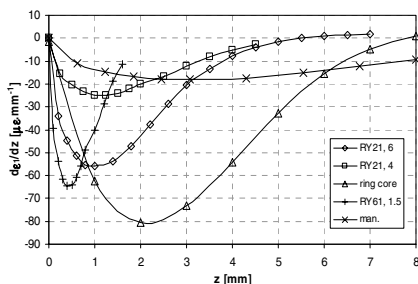
a) Odvrtání otvoru



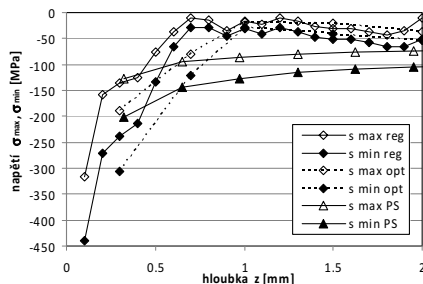
b) Odvrtání mezikruží

Obr. 2 Zařízení pro měření zbytkového napětí, používaná ve VZÚ Plzeň

Maximální citlivost tyto metody dosahují v intervalu 0,5 až 2 mm pod povrchem, napětí v hloubce 8 mm jsou již neměřitelná. Porovnání možných vyhodnocovacích metod je ukázáno na obr. 4. na průběhu zbytkových napětí po hloubce, kde je vidět, že integrální metodou lze separovat povrchová napětí, vzniklá od mechanického opracování od vnitřních napětí, vzniklých tepelným zpracováním (rozhraní je v hloubce cca 1 mm). Naopak metoda „power series“ dává nereálně vysoké hodnoty po celé měřené hloubce. Měření bylo provedeno na normalizačně žíhaném hřídeli turbínového rotoru ($\varnothing 630$ mm) z materiálu 28CrMoNiV59 v krocích po 0,1 mm vrátkem o průměru 4 mm do hloubky 2 mm.

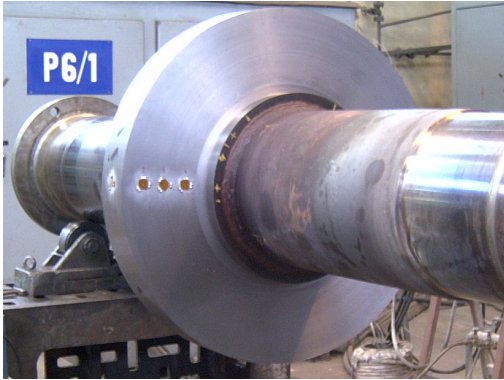


Obr. 3 Porovnání citlivosti metod



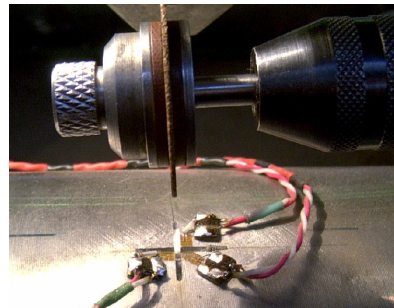
Obr. 4 Průběh napětí po hloubce

Na obr. 5 je na prvním obrázku příklad měření na disku rotoru turbíny s celo - obvodovým návarem (velká růžice HBM RY21, vrtaný otvor), na druhém obrázku je použita malá růžice HBM RY 61 (vrtaný otvor $\varnothing 1,5$ mm) pro určení napětí u paty obvodového svaru malého nátrubku.



Obr. 5 Příklady aplikace metody odvrtání otvoru

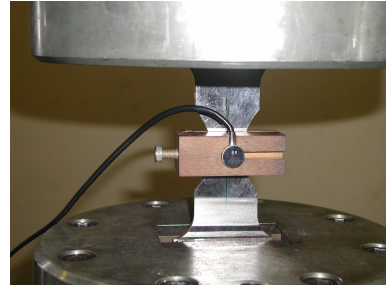
Ve VZÚ Plzeň používáme ještě vlastní semidestruktivní metodu pro měření zbytkových napětí, kdy úplné relaxace napětí v materiálu se dosahuje vybroušením dvou pravoúhlých drážek o šířce 1 mm do hloubky 3 mm. Přípravek pro měření je uveden na obr. 6.



Obr. 6 Zařízení pro měření zbytkového napětí rozřezávací metodou

2. 2 Magnetické metody

Magnetické metody využívají pro měření vnitřních napětí odezvu materiálu na působící střídavé magnetické pole [4]. Magnetoelastická metoda detekuje vznikající Barkhausenův šum, jehož úroveň je však funkcí nejen napětí v materiálu, ale rovněž jeho mikrostruktury a tvrdosti. Proto se komerčně vyráběná zařízení používají nejen pro měření zbytkových napětí (Stresscan, fy. AST), ale rovněž pro kontrolu povrchových defektů (Rollscan, fy. AST). Magnetostrikční metoda využívá měření změn magnetické indukce detekční cívkou. Ve VZÚ Plzeň je k dispozici zařízení ION-C (obr. 7), jehož sonda obsahuje dvě magnetizační cívkou a dvě snímací cívkou. Jeho výstupní signál je citlivý na rozdíl hlavních poměrných deformací. Toto uspořádání bylo zvoleno proto, aby kalibrační křivka byla monotónně stoupající i v tahové oblasti. Zařízení je možno použít pro případ jednoosé napjatosti nebo tam, kde je znám poměr hlavních napětí.

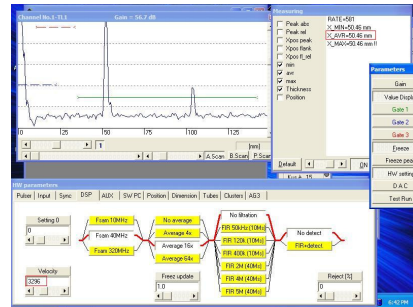


Obr. 7 Zařízení ION-C pro měření ZN a jeho sonda při kalibraci vzorku

2. 3 Ultrazukové metody

Ultrazukové metody jsou založeny na vztahu mezi rychlostí šíření vlny a elastických konstant materiálu. Pro měření se používají podélné nebo příčné polarizované vlny a lze realizovat měření integrální přes celý průřez vzorku nebo měření povrchových napětí povrchovými vlnami. Využitím akustoelastického dvojglomu při měření příčně polarizovanými vlnami ve dvou na sobě kolmých rovinách je možno určit rozdíl hlavních napětí. Při současném měření podélnými a příčnými vlnami je možno eliminovat některé vstupní hodnoty, potřebné pro výpočet, protože obě vlny se šíří různou rychlostí.

Ve VZÚ Pízeň je k dispozici zařízení EMAT s elektromagnetickým akustickým měničem a speciálním softwarem DIO 2000 od fy. Starmans s.r.o., původně určené pro měření tloušťky materiálu. Měření zbytkového napětí je tedy integrální přes celý průřez materiálu. Rychlost šíření vlny se měří na základě měření echa odražené vlny a ze známé tloušťky materiálu.



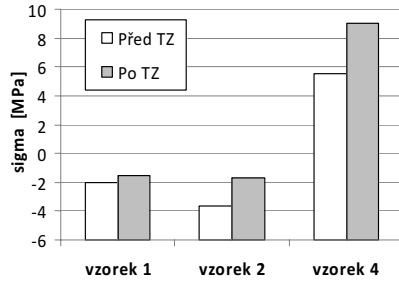
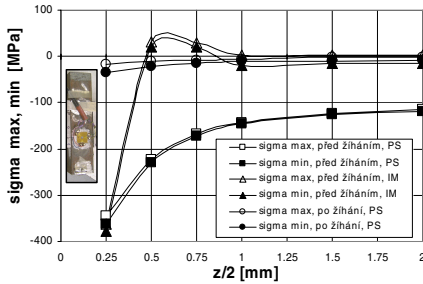
Obr. 8 Zařízení EMAT a obrazovka software DIO 2000 fy. Starmans s.r.o.

3. Příklady aplikace metod pro energetické strojírenství

Jako příklad aplikace je uvedeno měření ZN na polotovaru kované tyče (hranol 45 × 45 × 248) z materiálu X10Cr13 pro výrobu turbinových lopatek metodou odvrtání otvoru a metodou ultrazukovou. Ultrazukovou metodou byla měřena velmi nízká ZN, která neodpovídala odvrtání otvoru, vyhodnocené metodou power series (PS). Teprve použití integrální metody (IM) ukázalo, že ZN jsou v povrchové vrstvě,

takže ultrazukovou metodou, měřící integrálně přes celou tloušťku materiálu, je nelze zaznamenat. Na obr. 9 a je dále vidět přerozdělení napětí po hloubce – kompenzace tlakového povrchového napětí tahovým. Po vyžhání materiálu ZN podstatně pokleslo.

Na obr. 10 je vidět průběh zbytkového napětí, měřeného podél vzorku č.3 s částečně vyfrézovanou patkou.

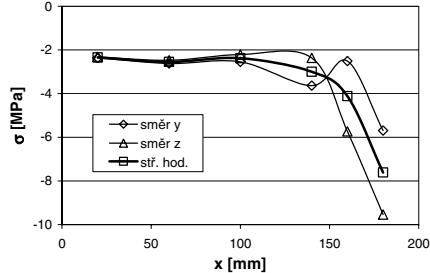
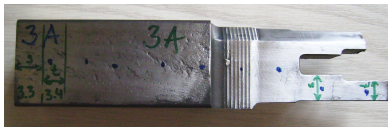


a) Metoda odvtřání otvoru

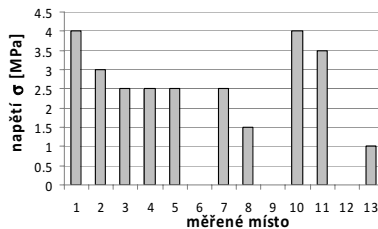
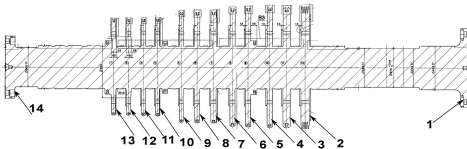
b) ultrazuková metoda

Obr. 9 Průběh ZN v povrchové vrstvě polotovaru tyče před a po vyžhání

Na obr. 11 je typický příklad aplikace ultrazukové metody pro ověření úrovně zbytkového napětí v discích hotových turbinových rotorů, kde je nezbytné použití nedestruktivní techniky.



Obr. 10 Průběh zbytkového napětí podél polotovaru s vyfrézovanou patkou



Obr. 11 ST rotor Ledvice a vyhodnocení zbytkových napětí na discích rotoru

3. Závěr

Univerzální technika pro měření zbytkových napětí neexistuje. Optimálním postupem je kombinace několika vhodných metod, volených podle povahy měřené součásti a očekávaného rozložení zbytkového napětí.

V rámci dalšího vývoje metod měření ZN se v budoucnu zaměříme na zdokonalení integrálních metod a měření ultrazvukem, kde bychom rádi zavedli měření povrchovou vlnou za použití tandemových ultrazvukových sond.

Literatura

- [1] ASTM E837-08 *Standard Test Method for Hole-Drilling Strain Gage Method*, Amer. Soc. for Testing and Materials, (2008).
- [2] Bohdan, P., Holý, S., Jankovec, P., Jaroš, P., Václavík, J., Weinberg, O.: Residual stress measurement using ring-core method., *Sb. konference EAN 2008, červen 2008, Horní Bečva*.
- [3] Václavík, J., Bohdan, P., Holý, S., Weinberg, O.: Residual stress evaluation according ASTM E 837-08 revision. *Sb. konference EAN 2009, červen 2009, Sychrov*.
- [4] James, M., Lu, J., Roy, G.: *Handbook of measurement of residual stresses*. SEM, Fairmont Press, INC., 1996, ISBN 0-88173-229-X.
- [5] Štemberk, J., Koc, J.: *Měření vnitřních pnutí ultrazvukem*. Výzkumná zpráva VYZ 0964/06, ŠKODA VÝZKUM s.r.o., Plzeň, 1996.

