

# Experimentální Analýza Napětí 2003

## RESIDUAL STRESS DETERMINATION – ONE OF THE TOOLS FOR PRODUCT QUALITY EVALUATION

### STANOVENÍ VELIKOSTI ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ – JEDEN Z NÁSTROJŮ POSUZOVÁNÍ KVALITY VÝROBKŮ

Stanislav Holý<sup>1</sup>, Karel Doubrava, Jaroslav Václavík<sup>2</sup>, Karel Vítek, Otakar Weinberg

*The paper deals with an application of drilling method in order to determine the residual stresses in forgings for driving railway axles. Residual stress was measured in two forgings with different heat treatment. Both axles were identically heat treated by hardening and tempering. Then one axle was annealed in order to eliminate residual stress. The process of measuring and the experiment results are described. Experimental residual stress analysis has been becoming one of control method during production.*

#### Keywords

residual stress, hole drilling method, forgings, turbine rotors, railway axle, heat treatment, quality evaluation.

#### Úvod

Závažnost zbytkových napětí v současnosti vzrůstá ze dvou důvodů. Ke zvýšení konkurenční schopnosti [1] je snižována hmotnost konstrukcí vyšším využitím materiálu i užitím kvalitnějších materiálů. V obou případech se dostávají do celkového napětí i napětí zbytková jako neopominutelná, pokud chceme udržet stejnou úroveň bezpečnosti s dnešní. Dále pak k postižení technologických napětí u složených materiálů, zvláště pak u mikro a nano technologií. Stávající experimentální metody dovolují získat hodnoty zbytkových napětí po jednotlivých technologických operacích a tak poskytují věrohodné podklady pro posouzení jak spolehlivosti konečného výrobku, tak i ekonomie jeho výroby.

---

<sup>1</sup> Prof. Ing. Stanislav Holý, CSc., Ing. Karel Doubrava, Ing. Karel Vítek, CSc. – ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, Technická 4, 166 07 Praha 6, tel: +420-224352510, email: Stanislav.Holy@fs.cvut.cz,

<sup>2</sup> Ing. Jaroslav Václavík, Ing. Otakar Weinberg – ŠKODA Výzkum s.r.o., Tylova 57, 316 00 Plzeň, tel.: +420-378044723, email: Otakar.Weiberg@skoda.cz

Postupy pro stanovení zbytkové napjatosti je dána materiálem ASTM Standard E 837, který je přijímán jako prakticky celosvětový standard. Ověření přesnosti a omezujících podmínek bylo provedeno v [3] a [4].

## **Praktická ukázka – železniční hnací náprava**

Podle požadavku zákazníka měření bylo určit velikost zbytkových pnutí na povrchu nápravových hřídelí po technologických operacích, tj. kování a následném tepelném zpracování pro dva hřídele shodného základního materiálu a shodné geometrie. Rozdíl mezi nimi byl v tom, že jeden byl v nadstavbovém programu žíhán na odstranění pnutí. Popisované měření bylo úvodním ze souboru probíhajících měření dle výše uvedené navrhované normy EN 13261. Pro určení měřících míst byly oba hřídele se surovým povrchem polotovaru umístěny do hrotů a v určených řezech proměřeny. Tenzometrické růžice byly aplikovány do míst s největším poloměrem nesoustřednosti, a to z důvodu dostatečného přídavku pro několikastupňové obrábění. Měřená místa na největších poloměrech nesoustřednosti byla vůči sobě obvodově pootočena což bylo způsobeno při výrobě technologií volného kování. Předpokladem použití odvrtávací metody byla homogenita materiálu a rovnoměrnost tepelného zpracování po průřezu. Protože úvodní měření zbytkových pnutí mělo hrubě zmapovat rozložení napětí po délce hřídele, bylo použito obecné pevnostní kritérium. Podle něho jsou naměřené hodnoty zbytkových pnutí vztažené k smluvní mezi kluzu materiálu měřeného hřídele. Přípouští se tlakové pnutí do 0,1 smluvní meze kluzu ( $0.1 R_{p 0.2}$ ). Vyhodnocení se provádí z naměřených deformací po stupňovitém odvrtávání po hloubce s krokem 1 mm. Pro výpočet je nezbytná znalost materiálových ( $E, \mu$ ) a tvarových ( $a, b$ ) konstant [5]. Materiálové konstanty se stanovují pomocí tenzometrického měření na svědečných vzorcích nebo jsou dodávány výrobcem materiálu. Ačkoliv vyhodnocení zbytkových pnutí bylo prováděno stupňovitě po hloubce vývrtu, je pro posouzení úrovně zbytkových pnutí rozhodující velikost těchto pnutí v hloubce odpovídající těžišti vypočtenému z poměru hloubky ku průměru odvrtného otvoru ( $1 \div 1,2$ ). Pro tento poměr je experimentálně prokázána deformační necitlivost použité tenzometrické růžice na další odebrání materiálu.

Měření bylo provedeno u obou hřídelí v 5 místech. Jejich základní materiál měl identické mechanické vlastnosti ( $R_m = 550 \div 650$  MPa,  $R_{p 0.2} = 320$  MPa, tažnost 22%). Hřídel žíháný na odstranění pnutí vykázal po vyhodnocení zbytkových pnutí nižší gradient po hloubce uvolňování a konečné hodnoty pro hloubku 2 mm s rozptylem hlavních napětí kolem nuly, prakticky ležícími v chybě metody. Zbytkové pnutí u nežíhaného hřídele mělo výrazný gradient po hloubce uvolňování a obojí hlavní napětí bylo výrazně v tlakové oblasti. Podmínky pevnostního kritéria byla dodržena. Lze konstatovat, že rovnoměrnost úhlu natočení pro jednotlivé uvolněné vrstvy byla pozoruhodná, což svědčí o rovnoměrnosti jak mechanického, tak tepelného zpracování obou nápravových hřídelí.

Vzhledem k tomu, že měření zbytkového pnutí je řazeno mezi kontrolní operace, musí každý měřený hřídel vyhovovat zadaným podmínkám. V případě nevyhovění musí být hřídel opakovaně tepelně zpracováván. Z řady měření během několika let lze konstatovat, že hřídele s nevyhovující velikostí zbytkových pnutí měly obvykle nevyhovující pevnostní hodnoty zjištěné tahovou zkouškou ( $R_m, R_{p 0.2}, \delta, \psi, a_j$ ). V hrubém rozlišení se hřídele vyrábějí z materiálů dle ČSN a materiálů dle speciálních požadavků zákazníka „dle předpisu“. Hřídele vyrobené z materiálů „dle předpisu“ ve velké většině požadovaným hodnotám zbytkového pnutí nevyhovují a musí projít opakovaným tepelným cyklem, který se dle zkušeností přesňuje. Dále je nutno upozornit na hřídele sice správně tepelně zpracované, ale před

měřením zbytkového pnutí obrobené hrubováním. U těch byl naměřen vysoký gradient zbytkových pnutí na povrchu výrazně ubývající s hloubkou. Takové zpevnění v povrchové vrstvě se odstranilo upravenou technologií obrábění načisto.

Uvedená měření a letité zkušenosti [6] prokazují plnou aplikovatelnost vhodných experimentálních metod analýzy napětí při zlepšování kvality vyráběných hřídelí jejich zařazením do technologických postupů jako jednu z kontrolních operací [7].

## Literatura

[1] Holý S., Vlk M., Hrabovský M.: *Experimental Mechanics of Solids – Today and Future*, In Proc 40 EAN – 40<sup>th</sup> Int. Conf. on Exp. Stress Analysis, CTU in Prague, June 2002, ISBN 80-01-02547-0, pp.77-86

[2] ASTM Standard E 837

[3] Dejmal J.: Aplikace moderních metod experimentální analýzy napětí pro vyšetřování zbytkových napětí, ČVUT FSI Praha, disertační práce, 1999

[4] Ganev N., Kraus I.: Different Methods of Residual Stress Analysis Require Different Interpretation, in Proc 16th Danubia-Adria Symp. on Exp. Meth. in Solid Mechanics, Cluj-Napoca, Sept. 1999, pp.7-8

[5] Vishay-MG-Tech Note TN 503-3

[6] Weinberg O.: Tenzometrická odvrtávací metoda pro zjišťování zbytkové napjatosti – Doporučení pro aplikace, techn. zpr. ŠKODA Výzkum, s.r.o.Plzeň, 1996

[7] Holý S., Doubrava K., Václavík J., Vítek K., Weinberg O.: *Determination of Residual Stresses in Forgings of Turbine Rotors of Different Heat Treatment*. In Proc 19th Danubia-Adria Symp. on Exp. Meth. in Solid Mechanics, Polanica Zdroj, September 2002, Warsaw. University of Technology, pp.224-225

Výzkum je podporován grantem GAČR 101/012/0769 „Metoda měření zbytkových napětí v železn. nápravách“