

Experimentální **A**nalýza **N**apětí **2005**

Experimentální stanovení zbytkových napětí jako podklad pro posouzení vhodného způsobu obrábění

Stanislav Holý¹, Jaroslav Václavík², Otakar Weinberg²

The paper deals with investigation of residual stresses in the forged large scaled turbine rotor after mechanical and heat treatments. For this purpose standard method for releasing residual stresses based on hole-drilling method was applied. Quantifying the residual stresses was processed in two zones of the rotor - on the shaft and on the body. On the prolonged shaft five zones with different parameters of mechanical machining followed by heat treatment were selected. On the body surface the determination was carried out after heat treatment with followed by fine machining of the surface carbonated layer. For determining residual stresses the methodology according to Measurements Group-Vishay TN-503-3 was used which was in good agreement with ASTM Standard E 837. The result of the carried out measurement were residual stresses in the selected zones on the shaft and on the body of the rotor. Presumption about the same magnitude of residual stresses in five shaft-zones was not validated. The results proved considerable superposition of mechanical machining with the thermal treatment. On the body the decisive value of residual stresses had to be determined 2mm under the surface and the permissible magnitude of residual stresses should not exceed 10% of the proportional limit of the rotor material. This condition was fulfilled.

Keywords Residual stress determination, hole-drilling strain-gage method, large size turbine rotor, rotor journal measurement zone, rotor body measurement zone, heat treatment, machining

Klíčová slova Určení zbytkového napětí, odvrtávací tenzometrická metoda, rozměrný turbinový rotor, oblast měření na čepu rotoru, oblast měření na těle rotoru, tepelné zpracování, strojní obrábění

Cílem měření bylo provést kontrolu velikosti zbytkových napětí ve vybraných místech na čepu a tělese turbinového rotoru po tepelném a mechanickém opracování. Ke zjištění velikosti zbytkových byla aplikována odvrtávací metoda s postupným odstraňováním materiálu po hloubce.

Pro vyhodnocení naměřených poměrných deformací byla využita metodika dle Measurements Group, TN-503-3. Měřicí metoda byla experimentálně ověřena v souladu s normou ASTM E837. Dle této normy je přesnost metody $\pm 5\%$ za předpokladu, že zbytková napětí nepřevyší 1/3 smluvní meze kluzu materiálu zkoušeného rotoru.

Zkušební vzorek-turbinový rotor /průměr 1170mm, délka 9400mm/ s čepem a tělem mechanicky opracovaným. Základní materiál 25CHN3MFA-R s tavbovou analýzou a mechanickými zkouškami dle předpisu. Zbytková napětí limitována předpisem, že měřené hodnoty na rotoru nepřekročí 10% meze únavy ($\sigma_r \geq 638$ MPa).

Měření bylo instrumentováno za použití měřicí techniky firmy HBM. Navrtávání bylo provedeno speciální vrtací frézou za pomoci vrtacího přípravku s možností optického ustředění a nastavení vrtané hloubky.

¹ Prof. Ing. Stanislav Holý, CSc. - ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky; Technická 4, 166 07 Praha 6, tel.: +420-2-24352510, e-mail: stanislav.holy@fs.cvut.cz;

² Ing. Jaroslav Václavík, Ing. Otakar Weinberg - ŠKODA Výzkum s.r.o., Tylova 1/57, 316 00 Plzeň, tel.: +420-378044723; e-mail: otakar.weinberg@skoda.cz;

Měřená místa byla na čepu a hlavní válcové části-těle rotoru. Zbytková napětí na čepu byla měřena v pěti místech. Povrch čepu byl před „šlechtěním“ obroben dle navrženého testovaného postupu /nástroje z RO a SK; úběry o hloubce 1,5mm/, a potom následovalo měření zbytkových napětí. Zbytkové napětí na těle rotoru bylo měřeno ve třech místech. Povrch těla byl po „šlechtění“ obroben dle předepsaného postupu nástrojem z RO, a potom následovalo měření zbytkových napětí. Zbytková napětí byla v měřených místech uvolňována postupným odvrtáváním do hloubek 1, 2, 3 a 4mm.

Stupňovitým odvrtáváním s krokem 1mm byly naměřeny velikosti poměrných prodloužení pro jednotlivé hloubky. Z těchto poměrných deformací byla vyhodnocena zbytková napětí včetně úhlu natočení. Pro vyhodnocení zbytkových napětí byly použity tvarové konstanty převzaté z literatury a následně experimentálně ověřené. Materiálové konstanty byly převzaty materiálových listů aktuálních měřených hodnot zkoušeného materiálu. Výsledky byly zpracovány do tabulek a grafů.

Z grafického zpracování naměřených hodnot poměrných deformací v závislosti na hladině uvolnění byl patrný velmi podobný průběh u všech pěti měřených míst čepu rotoru. Počáteční výrazně stoupající charakter nárůstu poměrných deformací ve všech třech měřených směrech byl v prvním kroku uvolnění zbytkových napětí /odvrtání do hloubky 1mm/. V dalších třech měřených hladinách /odvrtání do hloubek 2, 3, 4mm/ byl nárůst gradientu poměrných deformací malý až stagnující. V celém rozsahu měření byly poměrné deformace v tlakové oblasti. Srovnáním všech měřených míst na čepu rotoru lze konstatovat významné rozdíly v absolutní velikosti naměřených hodnot a v rozptylu měřených poměrných deformací pro jednotlivé měřené směry daného místa. Vypočtená zbytková napětí odpovídala naměřeným poměrným deformacím. Pro konečnou hloubku vrtání 4mm byly vypočtené hodnoty zbytkových napětí všech pěti měřených míst v rozsahu od $\sigma_{1-MAX.} = -21\text{MPa}$ až $\sigma_{2-MIN.} = -100\text{MPa}$.

Stejným způsobem jako u čepu rotoru byly graficky zpracovány naměřené hodnoty poměrných deformací v závislosti na hladině uvolnění pro tělo rotoru. Průběh u všech tří měřených míst se celkem výrazně odlišoval od průběhů poměrných deformací na čepu rotoru. Naměřené hodnoty poměrných deformací v měřených třech místech na těle rotoru měly ve všech stupních uvolnění mírně zvlněný charakter, a to od oscilace kolem nuly při odvrtání do hloubky 1mm až po tlakovou deformaci v dalších třech stupních odvrtání. Posouzením grafických průběhů byly konstatovány patrné rozdíly mezi jednotlivými měřenými místy a to jak v absolutní velikosti naměřených hodnot, tak i v rozptylu měřených poměrných deformací pro jednotlivé směry měření v každém měřeném místě. Vypočtená zbytková napětí potom odpovídala naměřeným poměrným deformacím. Pro konečnou hloubku vrtání 4mm byly vypočtené hodnoty zbytkových napětí všech tří měřených míst v rozsahu od $\sigma_{1-MAX.} = -10\text{MPa}$ až $\sigma_{2-MIN.} = -40\text{MPa}$.

Závěrem lze konstatovat, že na měřeném čepu rotoru se nepotvrdil předpoklad, že zbytková napětí budou ve všech měřených místech shodná. Lze předpokládat určitou superpozici účinků obrábění a tepelného zpracování s převažujícím vlivem tepelného zpracování. Podmínka, že zbytková napětí v plně uvolněném stavu nepřevýší absolutní hodnotu 10% R_{p02} byla splněna ve 4 místech, pouze v jednom měřeném místě byla mírně překročena. Tato podmínka byla splněna ve všech měřených místech na těle rotoru. Kde lze konstatovat, že vzhledem k měření zbytkové napjatosti v průměrné hloubce 2mm pod povrchem je patrné, že měřený stav vnucené napjatosti od obrábění byl dominantní.

Poděkování: příspěvek byl řešen v rámci GA ČR 101/05/2523; autoři děkují Grantové Agentuře za podporu při řešení tohoto úkolu.

Literatura

- [1] Weinberg, O.: „Protokol o zkoušce č. 959/2005 pro ŠKODA Steel“, Plzeň 2005
- [2] „Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method“ ASTM Standard E 837, 2001
- [3] „Measurement of Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method“, Technical Data TN-503-4, Photoelastic Inc., Rayleigh, 1993