

Experimentální Analýza Napětí

2004

RESIDUAL STRESS DETERMINATION IN RAILWAY AXLES

VYŠETŘOVÁNÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ V ŽELEZNIČNÍCH NÁPRAVÁCH

WEINBERG Otakar¹, VÁCLAVÍK Jaroslav¹, HOLÝ Stanislav²

Abstract: *The paper summarizes and recapitulates the application of drilling method in order to determine the residual stresses in the driving railway axles. Residual stress was measured in two railway axles with different basic heat treatment. After heat treatment for hardening and tempering, one axle was annealed in order to eliminate residual stress. The process of measuring and the results of the experiment are described in our paper.*

Keywords: *railway axle, forging, turning, grinding, roller burnishing, residual stress, hole drilling method, requirements EN 13261*

Souhrn: *Příspěvek shrnuje aplikaci odvrtávací metody pro určení zbytkových napětí v průběhu výroby železničních hnacích náprav. Zbytkové pnutí bylo měřeno na dvou železničních nápravách ze stejného materiálu, ale s rozdílným základním tepelným zpracováním výkovků. Po tepelném zpracování na zušlechtnění byla jedna náprava navíc žihána na odstranění zbytkových pnutí. Postup měření a výsledky tohoto experimentu předkládáme v našem příspěvku.*

Klíčová slova: *železniční náprava, kování, obrábění broušení, válečkování, zbytkové napětí, odvrtávací metoda, norma EN 13261*

1. Úvod

Zbytková nebo také technologická napětí jsou důsledkem výroby, montáže či provozu. Pokud nejsou překročeny určité limity, nemají zásadní vliv na bezpečnost, životnost a spolehlivost dané součásti a tím i celé konstrukce. Velikost předpětí v povrchové vrstvě předurčuje velikost rozkmitu při dynamickém zatěžování, kterému jsou beze sporu vystaveny železniční nápravy. Současné požadavky na vyšší výkony zařízení při současném apelu na vyšší spolehlivost vyžadují nejen materiály s lepšími mechanickými vlastnostmi a moderní prostředky pro výpočtovou i experimentální analýzu jako podklad pro stanovení namáhání konstrukce, její životnosti a spolehlivosti, ale současně i výrobní technologie a provozní podmínky na takové úrovni, které zajišťují plnou bezpečnost provozu. Nápravové hřídele patří mezi dlouhodobě dynamicky namáhané součásti vyráběné v relativně velkých sériích. Jejich kvalita ovlivní spolehlivost a bezpečnost kolejových vozidel, do kterých jsou zabudovávány. Mezi sledované parametry jakosti se tak dostává kontrola úrovně zbytkových

¹ Ing. Otakar Weinberg, Ing. Jaroslav Václavík, ŠKODA Výzkum, s.r.o., Tylova 57, 316 00 Plzeň, tel.: +420378044723, e-mail: otakar.weinberg@skoda.cz

² Prof. Ing. Stanislav Holý, CSc. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, Technická 4, 166 07 Praha 6

pnutí na povrchu hřídelí. Při vývoji prokazuje měření zbytkových napětí na nápravových hřídelích jak velká zbytková pnutí jsou vnášena v různých fázích výroby. Kritickým místem je povrch, kde dochází k iniciaci únavového lomu. Je zřejmé, že zbytková napětí tahového charakteru působí nepříznivě na povrchové defekty a snižují dovolený rozkmit střídavé složky namáhání. Naopak tlakové zbytkové napětí obecně přispívá jednak k omezení rozvírání defektů a při vhodné velikosti zvyšuje možný rozkmit střídavé složky. přitom podpovrchové složky zbytkového napětí, mající tahový charakter, zůstávají na nízké úrovni.

Metodický postup měření na nápravových hřídelích se opírá o návrh specializované normy EN 13261 [1], která stanovuje velikost povolených zbytkových napětí ze dvou hledisek. Z hlediska únavy požaduje, aby maximální hodnota zbytkových pnutí na povrchu hřídele byla menší nebo rovna 100 MPa. Další hledisko omezení možného vzniku poruch stanovuje kritérium velikosti zbytkových pnutí na hodnotu menší nebo rovnu 40 MPa, vypočtenou z rozdílu maximálního a minimálního naměřeného zbytkového napětí, stanoveného v normované hloubce pod povrchem hřídele. Navíc předepisuje kontrolu v minimálně 6 místech po obvodě řezu, jejichž výběr však ponechává na vůli zadavatele experimentu. K tomu připojuje i požadavek na maximální rozdíl sledované složky zbytkového napětí po povrchu válcové části nápravy.

Příspěvek se nezabývá rozvojem postupů při vyhodnocení zbytkové napjatosti z odměřených uvolněných prodloužení, ale zaměřuje se pouze při použití standardizovaných postupů na posouzení vhodných technologií a jejich parametrů na dosažené výsledky.

2. Použitá metoda

Odvrtávací metoda, která byla použita při určení zbytkových pnutí na povrchu hřídele, je řazena mezi tzv. metody semidestruktivní [2]. Otvor, který je nezbytný vyvrtat pro uvolnění zbytkových pnutí pod tenzometrickou růžicí, lze umístit tak, aby při finálním opracování součástky „načisto“ byla navrtaná vrstva odstraněna. Pro takové řešení se stává pak odvrtávací metoda v podstatě nedestruktivní. Stanovení velikosti pnutí v povrchové vrstvě je pak dáno výpočtem s pomocí rozdílu čtení tří tenzometrů speciální tenzometrické růžice před a po částečném uvolnění pnutí v důsledku navrtání definovaného otvoru. Z vypočtené poměrné deformace u jednotlivých tenzometrů a ze znalostí rozměrů otvoru, tenzometrů, navrtané hloubky, materiálových hodnot (E, μ) a teorie rozložení napětí kolem otvoru se stanoví hodnota zbytkového pnutí [2], [3].

Pro vlastní měření byly použity speciální tenzometrické růžice 3/120 RY 21 a 1,5/120 RY 61 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik s použitím tenzometrického tmelu Z 70. Pro navrtání definovaného otvoru byl použit přípravek s možností přesného ustředění a nastavení hloubky vrtání. Aby se do měřeného místa nezavádělo přídavné parazitní pnutí, nepoužívá se pro zhotovení otvoru běžný vrták s kuželovým ostřím, ale speciální dvojbřitá čelní fréza o průměru 2, resp. 4 mm, která je upnuta ve vřetenu odvrtávacího přípravku.

Při dodržení všech podmínek stanovených normou ASTM Standard E 837 je přesnost metody $\pm 5\%$ podle měření na přesně definovaném ohybovém etalonu. Tato hodnota se shoduje s podobným ověřením [5].

3. Vlastní experiment

Pokud jsou navíc hnací je otázka zbytkových napětí závažná a je ošetřována evropskou normou EN 13261 [1]. Ta určuje rámcově výběr řezů po délce a jednotlivých řezech pak počty, rozmístění měřených míst i průměry frézíček pro vývrty s ohledem na použitou tenzometrickou růžici, kterými se uvolněné deformace v okolí vývrty měří [2], [3], [4]. Zadání

stanovilo určit velikost zbytkových pnutí na povrchu nápravových hřídelí po technologických operacích, tj. kování a následném tepelném zpracování pro oba hřídele shodné základní geometrie a základního tepelného zpracování. Rozdíl mezi hřídeli byl v tom, že jedna z nápravových hřídelí byla v nadstavbovém programu žíhána na odstranění pnutí.

Popisované měření bylo úvodním ze souboru probíhajících měření dle výše uvedené navrhované normy EN 13261 [1]. Pro určení měřících míst byly oba hřídele se surovým povrchem polotovaru umístěny do hrotů a v určených řezech proměřeny. Tenzometrické růžice byly aplikovány po obvodě do míst s největším poloměrem nesoustřednosti, a to z důvodu dostatečného přídatku 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. Úvodní měření zbytkových pnutí hrubě zmapovalo rozložení napětí po délce hřídele abychom vyhověli obecnému pevnostnímu kritériu. Připouští se tlakové pnutí do 0,1 smluvní meze kluzu ($0.1 R_{p0.2}$). Vyhodnocení se provádí z naměřených deformací po stupňovitém odvrtávání po hloubce s krokem 1mm podle standardizovaných postupů [2], [3].

4. Výsledky měření

Měření bylo provedeno u obou náprav v pěti řezech. Základní materiál obou náprav měl shodné mechanické vlastnosti ($R_m = 550 \div 650$ MPa, $R_{p0.2} = 320$ MPa, tažnost 22%). Výkovek nápravy žíhaný 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, které prakticky odpovídaly chybě metody. Zbytkové pnutí u nežíhaného hřídele mělo výrazný gradient po hloubce uvolňování a obojí hlavní napětí bylo výrazně v tlakové oblasti.

Absolutní hodnoty, které nedosahovaly meze stanovené [1], prokázaly nepodstatný rozdíl mezi úrovní zbytkových napětí u nápravy žíhané a nežíhané. Proto je možné přijmout doporučení tuto operaci vynechat. Dále bylo prokázáno, že úrovně zbytkových napětí se v jednotlivých vrstvách po obrábění nemění, pokud jsou použity stejné podmínky obrábění včetně nástrojů.

Proto je zcela postačující provést zjištění po prvé vrstvě obrobené na čisto, s výjimkou oblastí broušených či válečkovaných. V těchto místech je u kontrolních kusů náprav nutno provést stanovení zbytkových napětí až po úplném dokončení.

Zmapování zbytkových napětí po povrchu a v časovém sledu operací dovolí pak posoudit oprávněnost uvažovaných technologických operací. Z hlediska času i financí je to výrazné u tepelných zpracování.

4. Závěr

Výsledky měření prokázaly, že pevnostní kritéria byla dodržena. Měření svými výsledky prokázalo na rovnoměrnosti úhlu maximálního zbytkového napětí, že ta pro jednotlivé uvolněné vrstvy byla shodného směru, což svědčí o rovnoměrnosti jak mechanického tak i tepelného zpracování obou nápravových hřídelí.

Na základě provedené analýzy zbytkových napětí v průběhu technologií, používaných při výrobě železničních náprav, bylo možné doporučit omezení počtů provedených experimentů výběrem řezu s nejnepříznivějšími hodnotami zbytkových napětí a dále omezením počtu experimentů při obrábění. Z druhého omezení vyplynulo snížení nároků na tepelná zpracování

na jedné straně a na druhé straně pak doporučení pro podmínky obrábění. Výsledkem jsou nezanedbatelné energetické a tím i finanční úspory včetně zkrácení výrobního cyklu.

Provedené experimenty prokázaly na základě praktické shody orientace maximálního zbytkového napětí jak po délce tak i při odebrání jednotlivých vrstev při obrábění rotační symetrií, což svědčí o rovnoměrnosti jak mechanického tak i tepelného zpracování hřídele. Dlouhodobé zkušenosti [7] spolu s rozбором spolehlivosti údajů, prováděných podle [8] prokázaly účinnost metody pro kontrolu výrobních technologií a při hodnocení a doporučení celého výrobního procesu.

Obě pracoviště pokračují na rozvíjení aplikací, postižení parazitních vlivů, jako je např. i nepatrná excentricita vrtaného otvoru nebo statistický přístup k hodnocení vstupních veličin do výpočtu zbytkových napětí. Po stránce organizační nepřestává snaha o vytvoření jakési národní referenční laboratoře pro zbytková napětí, která by kromě uvedené garantem nejen shora uvedené metody, ale i dalších na principu tenzometrie, RTG či magnetostrikčních.

Výsledky postupného řešení byly publikovány v průběhu posledních třech let na konferencích EAN a Danubia-Adria Symposiích.

V příspěvku jsou využity poznatky z řešení grantového projektu GA ČR č. 101/01/0769 „Metoda měření zbytkových napětí v železničních nápravách“ [9].

5. Literatura

- [1] Norma EN 13261
- [2] Schajer, G.S.: *Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method. Part I - Stress Calculation Procedures, Part II – Practical Application on the Integral Method.* Journal of Engineering Materials and Technology, Vol 110 Oct. 1988, pp. 338-349
- [3] “*Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*” ASTM Standard E 837-94a, 1994
- [4] “*Measurement of Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method*”, Technical Data TN-503-4, Photoelastic Inc., Rayleigh, 1993
- [5] Schwarz, T.; Kocklemann, H.: *Die Bohrlochmethode – ein für viele Anwendungsbereiche optimales Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen.* Messtechnische Briefe 29(1993), Heft 2, S. 33-38
- [6] Holý, S.; Doubrava, K.; Václavík, J.; Vítek, K.; Weinberg, O.: *Residual Stress Determination in Forgings of Railway Axles with Two Different Heat Treatment - Určení velikosti zbytkových pnutí ve výkovicích železničních náprav s rozdílným tepelným zpracováním.* In: proc 40th International Conference on Experimental Stress Analysis, CTU-FME Praha 2002, pp. 105-108
- [7] Weinberg O.: *Protokoly z měření zbytkových napětí na železničních hřídelích pro ŠKODA DT Plzeň, 2001- 2003*
- [8] Barlé, J.; Jecič, S.; Grubišič, V.: *On the Reliability of Residual Stresses Determined Using the Hole Drilling Method.* In: Proc 20th Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics, CTU-FME Praha 2000, pp. 21-24
- [9] Weinberg, O.; Holý, S.: *Metoda měření zbytkových napětí v železničních nápravách, závěrečná zpráva a soubor dokumentů z řešení grantového projektu č. 101/01/0769, ŠKODA VÝZKUM s.r.o., Plzeň a ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Plzeň 2004, 361 str.*