

RESIDUAL STRESS DETERMINATION IN FORGINGS OF RAILWAY AXLES WITH TWO DIFFERENT HEAT TREATMENT

URČENÍ VELIKOSTI ZBYTKOVÝCH PNUTÍ VE VÝKOVČÍCH ŽELEZNIČNÍCH NÁPRAV S ROZDÍLNÝM TEPELNÝM ZPRACOVÁNÍM.

Stanislav HOLÝ¹⁾, Karel DOUBRAVA¹⁾, Jaroslav VÁCLAVÍK²⁾, Karel VÍTEK¹⁾, Otakar WEINBERG²⁾

¹⁾ Czech Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Technická 4, 166 07 Praha 6

²⁾ ŠKODA Research Ltd., Tylova 57, 316 00 Plzeň

E-mail: Holys@fsid.cvut.cz, oweinberg@ln.vyzk.skoda.cz

Summary: The paper deals with an application of drilling method in order to determine the residual stresses in forgings of railway axles. Residual stress was measured in two forgings of railway axles 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 in our paper.

Key words: Residual stress, drilling method, special strain gauge rosette, heat treatment, railway axle forging

Abstrakt: Příspěvek popisuje aplikaci odvrtávací metody pro určení zbytkových pnutí ve výkovcích železničních náprav. Zbytkové pnutí bylo měřeno na dvou výkovcích železničních náprav s rozdílným tepelným zpracováním. U obou náprav shodně tepelně zpracovaných souborem tepelných úprav, označovaných zušlechtním, bylo u jedné nápravy rozšířeno o žíhání na odstranění zbytkových pnutí. Postup měření a výsledky tohoto experimentu předkládáme v našem příspěvku.

Klíčová slova: Zbytkové pnutí, odvrtávací metoda, speciální tenzometrická růžice, tepelné zpracování, výkovek železniční nápravy

Úvod

Současné požadavky na vyšší výkony zařízení při současné apelu na vyšší spolehlivost vyžadují použití nejen tzv. lepších materiálů a moderních prostředků výpočtových či experimentálních pro analýzu namáhání životnosti a spolehlivosti, ale současně i technologie výrobní a provozní, zajišťující plnou bezpečnost provozu. Jakákoli porucha vysoce namáhaných částí při provozu nutně vede k nehodám, často katastrofického rozsahu, jak známe tyto případy z dopravy letecké či vysokorychlostní železniční.

Nápravové hřídele patří mezi dlouhodobě dynamicky namáhané součásti vyráběné ve velkých sériích. To je řadí ke sledovaným výrobkům, kde jejich špičková kvalita výrazně ovlivní spolehlivost a bezpečnost kolejových vozidel, kam jsou zabudovávány. U takových výrobků je potom nezbytné propracovat jak výrobní technologie, tak systém kontrolních metod. Mezi sledované parametry jakosti se tak dostává kontrola úrovně zbytkových pnutí na povrchu hřídelí. Smyslem měření zbytkových pnutí na nápravových hřídelích je prokázat, že různé fáze výroby nevnašejí do hřídelí taková zbytková pnutí, která by v dlouhodobém provozu výrazně ovlivnila v záporném slova smyslu mez únavy použitého materiálu a případně inicializovala únavový lom.

Metodický postup měření na nápravových hřídelích se opírá o návrh specializované normy EN 13261 [1]. Návrh normy stanovuje kritérium povolených zbytkových napětí ze dvou hledisek. Hledisko

únavy požaduje velikost zbytkových pnutí na povrchu hřídele menší nebo rovné 100 MPa. Další hledisko omezení možného vzniku poruch stanovuje kritérium velikosti zbytkových pnutí na hodnotu menší nebo rovnou 40 MPa, vypočtenou z rozdílu maximálního a minimálního naměřeného zbytkového pnutí ze souboru minimálního počtu šesti měřených tenzometrických růžic v jednom řezu v normované hloubce pod povrchem hřídele (obr.1).

Zadavatelem úkolu byl učiněn návrh na umístění měřených míst na povrchu hřídele a to nejprve ve třech řezech. Hřídel pro dvojkolí je po délce členěn na stranu s jedním sedlem pro nalisování kola a na opačné straně je dvojitě sedlo pro umístění náhonu z převodovky a kola (obr.1). K měření je doporučena strana s jedním sedlem a měřené řezy jsou na válcové části tělesa hřídele těsně před a za osazením pro nalisování kola a ve středu hřídele – místa 4,5,7 v rámečku. V každém z těchto třech řezů se měří ve dvou místech vzájemně obvodově posunutých o 120°. Umístění tenzometrů mezi jednotlivými řezy není vzájemně vázáno. V těchto řezech je úkolem změřit zbytkové pnutí co nejbližší povrchu hřídele pro splnění podmínky $\sigma_D < 100 \text{ MPa}$. Po ukončení první části měření se doporučuje ve středním řezu umístit novou konfiguraci šesti tenzometrických růžic. Růžice jsou pak obvodově rozmístěny po 60° a proti již navrtaným otvorům z prvního měření posunuty o 30°. Pomocí těchto růžic se změří zbytkové pnutí v hloubce 2 mm pod povrchem a pro splnění jakostního kritéria je nutno dodržet podmínku, že rozdíl zbytkových pnutí $\sigma_D < 40 \text{ MPa}$.

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 je pak odvrtávací metoda 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. 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 dvojbřitá čelní fréza o průměru 4mm, která je upnuta ve vřetenu od vrtávacího přípravku.

Pro svou účelnost je odvrtávací metoda neustále zdokonalována jak po stránce metodické tak i přístrojové. Její použití je stanoveno normou ASTM Standard E 837 [3], která stanovuje podmínky, které je nutno předpokládat (materiál vyšetřované součásti je homogenní, izotropní, lineárně elastický, vypočtená napětí dosahují maximálně 50% meze kluzu měřeného materiálu a další).. Další požadavky klade norma na umístění tenzometrické růžice, její rozměry, svodový odpor, mechanickou ochranu tenzometrů před zplodinami vrtání, hloubku vrtání vztaženou k průměru vrtacího nástroje a další. Proto zařízení ze ŠKODA Výzkum, které bylo navrženo a vyrobeno podle shora uvedených předpisů již v. 1981 [5] bylo a je s novelizací normy experimentálně ověřováno, aby výsledky byly v souladu s platnou normou a tak splňovaly požadavky zákazníků. Kromě tohoto zařízení jsou používána dvě modernější od fy VISHAY a fy HBM. 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 [4].

Vlastní experiment

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 žihána na odstranění pnutí.

Popisované měření bylo úvodním ze souboru probíhajících měření dle výše uvedené navrhované normy EN 13261 [1]. Pro určení měřicích 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 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. 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. Pro výpočet je nezbytná znalost materiálových E, μ a geometrických konstant a a b . Materiálové konstanty se stanovují pomocí tenzometrického měření na svědečných vzorcích nebo jsou dodávány výrobcem. Konstanty a a b popisující rozměrové poměry tenzometrické růžice, průměru vrtaného otvoru a hloubky odebrání materiálu jsou použity z grafů [2]. Ačkoliv se vyhodnocení zbytkových pnutí provádí stupňovitě po hloubce je pro posouzení úrovně zbytkových pnutí rozhodující velikost těchto pnutí v hloubce odpovídající těžišti vypočtenému z poměru hloubky ku průměru odvrtaného 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 pěti řezech (obr. 1), označených číslicemi v rámečku. Základní materiál obou hřídelí měl shodné mechanické vlastnosti ($R_m = 550 \div 650$ MPa, $R_{p0.2} = 320$ MPa, tažnost 22%). Hřídel 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 (obr.2). Zbytkové pnutí u nežíhaného hřídele mělo výrazný gradient po hloubce uvolňování a obojí hlavní napětí bylo výrazně v tlakové oblasti.(obr.3).

Shrnutí

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.

Dlouhodobé zkušenosti [7] prokázaly, že odvrtávací tenzometrická metoda je při zvládnutí aplikačních problémů účinnou metodou pro kontrolu výrobních technologií. Kromě nasazení této metody připravuje se i použití plně nedestruktivní metody rentgenografické. K dalším možným metodám pro zjišťování zbytkových napětí slouží metody magnetostrikční a ultrazvukové.

Literatura

- [1] Norma EN 13 261
- [2] Measurement of Residual Stresses by Hole Drilling Strain Gage Method, *Technical Notes TH-503-3 Vishay Measurement Group TN -503F*
- [3] Norma ASTM Standard E 837
- [4] Holý S., Dejmal J., Ganev N., Kraus I.: Quantitative Comparison of Stress Evaluation Methods. *Proc 17th Danubia-Adria symposium on Exper. Methods in Solid Mechanics, CTU Prague, Oct. 2000, pp.129-130*
- [5] Havlík J.: Vyhodnocení zbytkových pnutí naměřených navrtávací metodou, tech.zpráva Škoda-ÚVZÚ-VS, 1978
- [6] Weinberg O.: Použití odvrtávací metody pro zjišťování zbytkových pnutí; Návrh metodického postupu, Škoda ÚVZÚ1996
- [7] Weinberg: Protokoly měření zbytkových pnutí na hřídelích 1991÷2001
- [8]] Schajer: 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*

Tyto práce byly vykonány v rámci grantu GA ČR č.101/01/0769.