

STANOVENÍ ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI-JEDEN Z NÁSTROJŮ PRO VÝBĚR OPTIMÁLNÍ TECHNOLOGIE

RESIDUAL STRESS DETERMINATION – ONE OF THE TOOLS FOR PRODUCT OPTIMIZE TECHNOLOGY SELECTION

Stanislav HOLÝ¹, Václav HAMPL², Jaroslav VÁCLAVÍK³, Otakar WEINBERG³

Abstrakt

V příspěvku je popsáno zjišťování hloubky povrchové vrstvy zpevněné válečkováním na dvou nápravách typu A4T [1]. K tomuto účelu byl použit standardní postup uvolňování zbytkových napětí tenzometrickou odvrtávací metodou s postupným odstraňováním materiálu po hloubce. Velikost zbytkových napětí byla určována na stupňovitě opracovaných průměrech obou náprav a to až do stavu prokazujícího minimální hodnoty zbytkových napětí. Jednotlivé měřené průměry byly opracovány speciálním postupem, zajišťujícím minimální mechanické ovlivnění měřeného povrchu. Měřený povrch jednotlivých průměrů byl stupňovitě odebrán soustružením s krokem úběru 1mm na plochu. Pro měření zbytkových napětí tak byla připravena série zmenšujících se průměrů s úběrem až 9 mm. Zbytková napětí byla měřena technikou od firmy HBM včetně použitých tenzometrických snímačů. Pro vyhodnocení zbytkových napětí byla využita metodika dle Measurements Group-Vishay, TN-503-3 [4] a použitá měřicí metoda byla experimentálně ověřena s normou ASTM Standard E 837 [3]. Výsledkem měření bylo zjištění velikosti zbytkových napětí ve vybraných průměrech na povrchu měřených náprav a z toho určení hloubky zpevnění technologií válečkování [2]. Bylo zjištěno, že kulminující hloubka, kdy již odeznívá zpevňující účinek válečkování, je průměr nápravy s úběrem cca 7 mm na plochu.

Klíčová slova: Určení zbytkového napětí, náprava A4T, válečkování, odvrtávací tenzometrická metoda, oblast měření na průměru nápravy, speciální mechanické opracování.

Abstract

The paper deals with the determination of the thickness of the surface layer work-hardened by roller peening on two railway driving axle A4T produced by co. ŠKODA Transportation Ltd. Plzeň. This reinforced layer influences evidently quality from the point of fatigue. The thickness of this layer is also very important. For reliability of all structural parts dynamically loaded as the examined railway axles are [1] the magnitude of residual stresses as well as the thickness of the surface layer is very important, sometimes critical. The thickness of this layer was determined on the results of standard incremental hole-drilling strain gage method [2]. The cylindrical surface of the axle in effected zones was carefully turned not to induce any additional residual stresses and on the stepped (6 steps) axle residual stresses were determined. On every diameter the residual stresses along the depth were determined as far as the residual stress magnitude becomes minimal. The effect of this measurement was determination of the layer work-

¹ prof. Ing. Stanislav HOLÝ, CSc., Faculty of Mechanical Engineering, Czech Technical University in Prague, Praha, stanislav.holy@fs.cvut.cz

² Ing. Václav HAMPL, SKODA Transportation Ltd., Plzeň, vaclav.hampl@skoda.cz

³ Ing. Jaroslav VÁCLAVÍK, Ing. Otakar WEINBERG, SKODA Research Ltd., Plzeň, otakar.weinberg@skoda.cz

Lektoroval: Dr.h.c. prof. Ing. František TREBUŇA, CSc., KAMaM, Sjf TU v Košiciach, frantisek.trebuna@tuke.sk

hardened depth due to roller peening technology. In the described case the depth where reinforced influence induced by roller peening is about 7 mm.

Keywords: Residual stress determination, driving axle A4T, roller peening, hole-drilling strain-gage method, measurement zone on the diameter of the driving axle, special machining.

ÚVOD A CÍL MĚŘENÍ

Cílem měření bylo zjistit hloubku zpevněné válečkované vrstvy na povrchu nápravy A4T. K tomuto účelu byl použit standardní postup uvolňování zbytkových napětí tenzometrickou odvrtávací metodou s postupným odstraňováním materiálu po hloubce. Velikost zbytkových napětí byla určována na stupňovitě opracovaných průměrech obou náprav a to až do stavu, prokazujícího minimální hodnoty zbytkových napětí.

METODIKA MĚŘENÍ A ZKUŠEBNÍ VZORKY

Ze souboru obecně známých metod pro vyhodnocení zbytkových napětí byla zvolena metoda dle Measurements Group, TN-503-3. Tento způsob vyhodnocení zbytkové napjatosti byl dle našich zkušeností nejvhodnějším pro téma zadání, tj. prosté určení hloubky zpevnění povrchové vrstvy válečkováním. Metody, které umožňují měření rozložení zbytkového napětí po hloubce (např. metoda integrální, metoda Kockelmanova a další) nebyly použity, protože byly nahrazeny vlastním odstraňováním materiálu. Kromě toho tyto metody vykazují vysoký rozptyl. Použitá měřicí metoda byla experimentálně ověřena v souladu s normou ASTM E837. Dle této normy je přesnost metody $\pm 5\%$ za předpokladu, že zbytková napětí nepřevýší 1/3 smluvní meze kluzu materiálu zkoušených náprav.

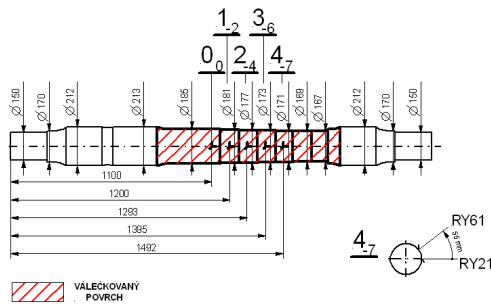
Zkušebními vzorky byly dva kusy náprav A4T (průměr 212mm, délka 230 mm) s tělem ve střední části v délce cca 600 mm mechanicky zpevněným válečkováním. Polotovary zkušebních vzorků byly vyrobeny ze základního materiálu A4T s tavbovou analýzou a mechanickými zkouškami dle předpisu a standardním tepelným zpracováním. Jeden ze vzorků byl po zušlechtnění žihán na odstranění zbytkových napětí. Následně byly obě nápravy mechanicky opracovány a v požadovaném úseku zpevněny válečkováním a tím byl připraven povrch pro vlastní měření zbytkového napětí.

INSTRUMENTACE ZKOUŠKY

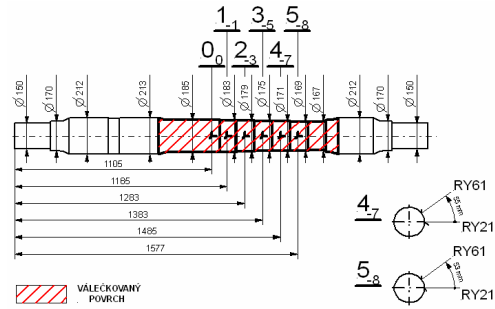
Měření bylo instrumentováno za použití měřicí techniky firmy HBM. Pro měření zbytkových napětí byly použity tenzometrické růžice RY21 a RY61S. Navrtávání bylo provedeno speciální vrtací frézou za pomoci vrtacího přípravku s možností optického ustředění a nastavení vrtané hloubky. Zbytková napětí byla v měřených místech uvolňována postupným odvrtáváním a to pro růžice RY21 do hloubek 1, 2, 3 a 4 mm a pro růžice RY61S do hloubek 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 1 a 1.5 mm.

MĚŘENÁ MÍSTA

Válečkovaná oblast, (obr.1, obr.2.) cca ve středu obou náprav, byla opracována na šest úseků v délce cca 100 mm se zmenšujícími se průměry s krokem 1 mm. Měřená místa byla cca ve středu každého úseku celkově řazena v osové "površce" nápravy. Na "žihané" nápravě bylo zbytkové napětí měřeno na pěti průměrech růžicemi RY21; dva poslední průměry byly souběžně kontrolovány růžicemi RY61S. Klasicky opracovaná náprava byla měřena ve čtyřech průměrech růžicemi RY21 a poslední průměr byl kontrolován růžicí RY61S.



Obr.1 Náprava A4T žíhaná,
měřená místa 0 až 5



Obr.2 Náprava A4T nežíhaná,
měřená místa 0 až 4

ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

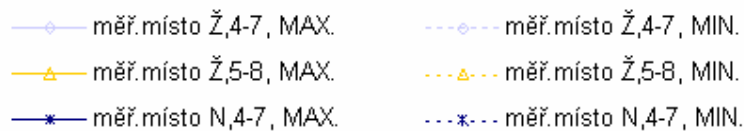
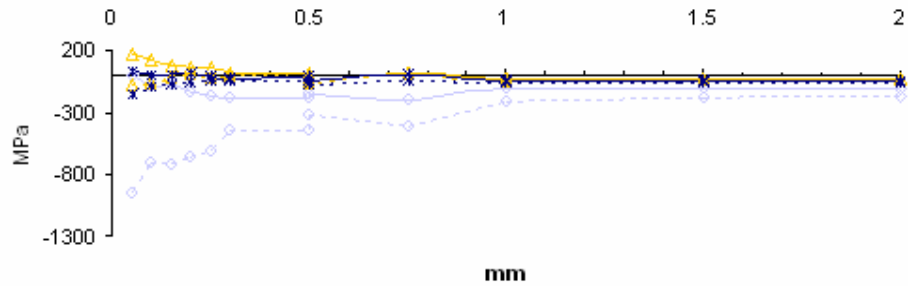
Stupňovitým odvrtáváním s krokem pro jednotlivé rŮžice výše popsaným byly naměřeny velikosti poměrných prodloužení pro jednotlivé hloubky odvrtání. Z těchto poměrných deformací byla vyhodnocena zbytková napětí včetně úhlu natočení. Pro vyhodnocení zbytkových napětí byly použity tvarové konstanty převzaté z literatury [4] a následně experimentálně ověřené tak, aby odpovídaly typům použitých rŮžic. Materiálové konstanty byly převzaty z materiálových listů aktuálních měřených hodnot zkoušeného materiálu. Výsledky byly zpracovány do tabulek a grafů.

Rozborem výsledků byly porovnány naměřené hodnoty z rŮžic RY21 a odděleně z rŮžic RY61S bez ohledu na jejich umístění na druhu úpravy nápravy. Pro rŮžice RY21 bylo provedeno porovnání naměřených hodnot poměrných deformací v závislosti na hladině uvolnění (hloubce odvrtání) a to u všech devíti měřených míst obou náprav. Výrazně stoupající, charakter nárůstu poměrných deformací ve všech třech měřených směrech byl v prvním kroku uvolnění zbytkových napětí (odvrtání do hloubky 1mm). V následných třech měřených hladinách (odvrtání do hloubek 2, 3, a 4 mm) byl nárůst gradientu poměrných deformací malý až stagnující. Srovnáním všech měřených míst u obou náprav byly patrné rozdíly v absolutní velikosti naměřených poměrných deformací. Tento stav je obtížně vysvětlitelný, ale lze usuzovat na určité nerovnoměrné seřízení nastavení přitlačné síly a posuvu při válečkovaní, ale nelze vyloučit ani vliv předchozího tepelně-mechanického opracování na hloubku zpevnění. Rozdílné tepelné zpracování obou vzorků nemělo vliv na hodnotu zbytkového napětí na povrchu vzorků. Dalším rozbohem naměřených hodnot bylo zjištěno, že postupným úběrem válečkované vrstvy se výrazně snižovala velikost zbytkových napětí. Pro určení velikosti zbytkových napětí přechodové zóny mezi zpevněnou a nezpevněnou vrstvou a k zpřesnění její polohy byly použity tenzometrické rŮžice, umožňující vrtat s jemnějším krokem (RY61S). Hodnoty poměrných deformací tenzometrických rŮžic RY61S měly však v průběhu výrazný rozptyl. Tento rozptyl je zřejmě způsoben charakterem zpevněné hraniční zóny a její polohou mezi zpevněnou a nezpevněnou vrstvou nápravy a nelze rovněž vyloučit superpozici vlivu mechanického opracování. Tyto naměřené hodnoty proto sloužily pouze k doplnění průběhu poměrných deformací po hloubce sledovaného místa. Příklad průběhu uvolnění zbytkových napětí pro hloubky vrtání v celém měřeném rozsahu do 4 mm pro úběr na 7 a 8 mm a dále pro hloubku vrtání 1 mm pro žíhanou a nežíhanou nápravu viz. tab.1-3 a obr.3 až obr.5.

Zbytkové napětí pro úběry od povrchu

Tabulka 1

A4T ŽÍHANÁ A NEŽÍHANÁ												
hloubka Z/2 [mm]	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.30	0.50	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00
měř. místo Ž, 4 ₋₇ , MAX.	2	-83	-77	-132	-171	-177	-184	-154	-192	-110	-106	-106
měř. místo Ž, 4 ₋₇ , MIN.	-950	-710	-721	-661	-610	-445	-444	-318	-419	-208	-176	-173
měř. místo Ž, 5 ₋₈ , MAX.	169	122	78	66	57	17	19	-40	23	-36	-32	-33
měř. místo Ž, 5 ₋₈ , MIN.	-74	-53	-19	15	-13	-3	-12	-55	10	-40	-35	-36
měř. místo N, 4 ₋₇ , MAX.	33	1	6	11	-14	-30	-17	-46	-5	-45	-43	-41
měř. místo N, 4 ₋₇ , MIN.	-152	-87	-75	-60	-47	-41	-45	-72	-38	-60	-56	-54



Obr.3 Graf uvolněných zbytkových napětí A4T žíhaná a nežíhaná

Pozn.:

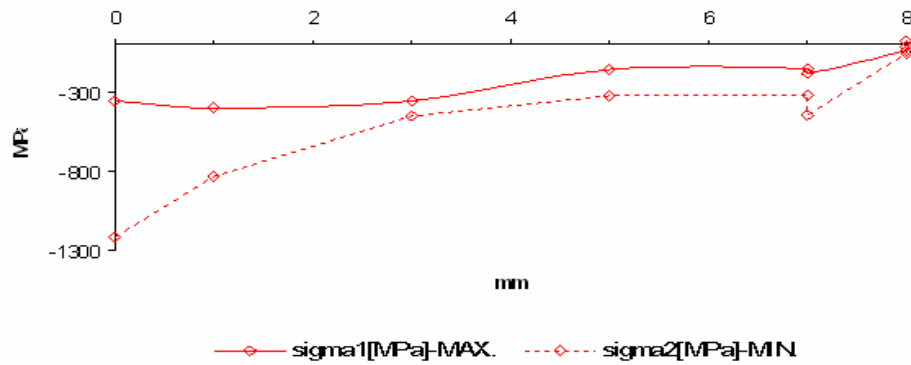
tenz. RY 21

tenz. RY 61S

Zbytkové napětí pro úběry od povrchu

Tabulka 2

A4T ŽÍHANÁ, hloubka Z/2=0.5								
měř. místo Ž	0 ₀	1 ₋₁	2 ₋₃	3 ₋₅	4 ₋₇	4 ₋₇	5 ₋₈	5 ₋₈
úběr od povrchu [mm]	0	1	3	5	7	7	8	8
zbytkové napětí, MAX.	-355	-404	-359	-161	-154	-184	-40	19
zbytkové napětí, MIN.	-1217	-837	-452	-322	-318	-444	-55	-12



Obr.4 Graf uvolnených zbytkových napětí A4T žíhaná

Pozn.:

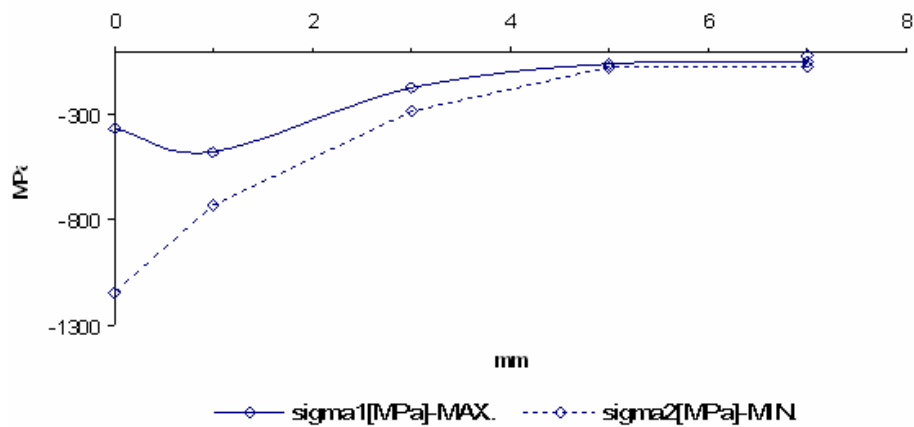
tenz. RY 21

tenz. RY 61S

Zbytkové napětí pro úběry od povrchu

Tabulka 3

A4T NEŽÍHANÁ, hloubka Z/2=0.5						
měř.místo N	0 ₀	1 ₂	2 ₄	3 ₆	4 ₇	4 ₇
úběr od povrchu [mm]	0	1	3	5	7	7
zbytkové napětí, MAX.	-362	-476	-171	-56	-46	-17
zbytkové napětí, MIN.	-1146	-727	-282	-73	-72	-45



Obr.5 Graf uvolnených zbytkových napětí A4T nežíhaná

Pozn.:

tenz. RY 21

tenz. RY 61S

ZÁVĚR

Závěrem lze konstatovat, že povrchová vrstva měřených náprav, zpevněná válečkováním, je v radiálním směru do hloubky cca 7 až 8 mm. Z naměřeného rozdílu uvolněných účinků válečkování u měřených náprav lze usuzovat na nastavení přitlačné síly při válečkování. Dále lze konstatovat, že mechanické a tepelné opracování před válečkováním nemá vliv na hodnotu zbytkového napětí, dosaženého válečkováním a ani výrazný vliv na hloubku zpevnění. Z výsledků měření lze konstatovat, že použitá měřicí metoda včetně způsobu vyhodnocení je vhodná pro řešené zadání. Dále se ukázalo, že kvantifikace účinku zpevnění pouze z povrchového měření bez stupňovitého obrobení je prakticky nemožná a proto bylo doporučeno provádět pro určitá nastavení přitlačné válečkovací síly kontrolní měření zbytkových napětí na prokázání hloubky zpevnění povrchové vrstvy stejným způsobem, jako bylo postupováno ve výše popsaném měření.

Poděkování: příspěvek byl řešen ve spolupráci se ŠKODA TRANSPORTATION s.r.o. a v rámci projektů GA ČR 101/05/2523 a MŠMT ČR 1M4977751302; autoři děkují všem třem organizacím za podporu při řešení tohoto úkolu.

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
- [4] "Measurement of Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method", Technical Data TN-503-3,
- [5] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F.: *Kvantifikácia zvyškových napätí tenzometrickými metodami*, Grafotlač Prešov, 2005