

ANALÝZA ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ BANDÁŽOVANÝCH VÁLCŮ

THE RESIDUAL STRESS ANALYSIS OF BANDING ROLLS

Pavel MACURA, Zdeněk BEMBENEK¹, Bronislav MOLINEK²

Abstrakt

Článek je venovaný problémem výroby a kvality bandážovaných valcov valcovacích stolic. Technologický proces výroby bol skúmaný hlavne z hľadiska vytvárania a priebehu zvyškových napätí. Meranie zvyškových napätí v bandáži sa uskutočnilo pomocou metódy odvrátania po tepelnom spracovaní a pred bandážovaním. Bola lokalizovaná veľká nerovnomernosť rozloženia zvyškových napätí. Súčasne s meraniami zvyškových napätí boli vykonané teoretické výpočty napätí od nalisovania. Bola vykonaná superpozícia začiatkových zvyškových napätí v bandáži s napätiami po bandážovaní a výsledky boli porovnané s výslednými napätiami nameranými po bandážovaní. Zhoda výsledkov bola dobrá, výsledné napätia na vonkajšom povrchu bandáže boli tlakové.

Kľúčové slová: zvyškové napätia, metóda odvrátania, bandážované valce.

Abstract

The paper is devoted to the problems of production and quality of banding rolls for rolling mills. The technological process of production was investigated mainly because of the development and course of residual stresses. The residual stress measurements at bandage were performed by means of hole-drilling strain gage method after heat treatment and before banding. The great non-uniformity of residual stress distribution was located. The residual stress measurements after banding were performed as well as the theoretical calculations of stresses at pressing. The superposition of the beginning residual stresses at bandage with the stresses from banding was performed and the results were compared with the results of final stress measurements after banding. The agreement of results was good, the final stresses on the external surface of bandage were compressive.

Keywords: residual stress, hole-drilling method, banding rolls.

ÚVOD

Na válce válcovacích stolic jsou kladeny vysoké nároky, mnohdy navzájem protichůdné. Musí vykazovat dostatečnou pevnost a zároveň houževnatost vzhledem k únavovému způsobu namáhání. Jejich povrch však musí být velmi tvrdý a odolný proti opotřebení a kontaktní únavě. Těmto požadavkům vyhovují bandážované válce, sestávající z vnitřního válce, vyrobeného z houževnatého materiálu, na který je nalisována bandáž z materiálu oteruvzdorného a vhodně tepelně zpracovaného. Při výrobě takovýchto válců v nich vznikají jednak značná zbytková napětí od tepelného zpracování, jednak napětí od nalisování. Výpočet zbytkových napětí po tepelném zpracování je problematický, proto se přistoupilo k jejich měření, měřila se i výsledná napětí po nalisování. Některé případy měření zbytkových napětí hutních a strojírenských výrobků jsou uvedeny v práci [1].

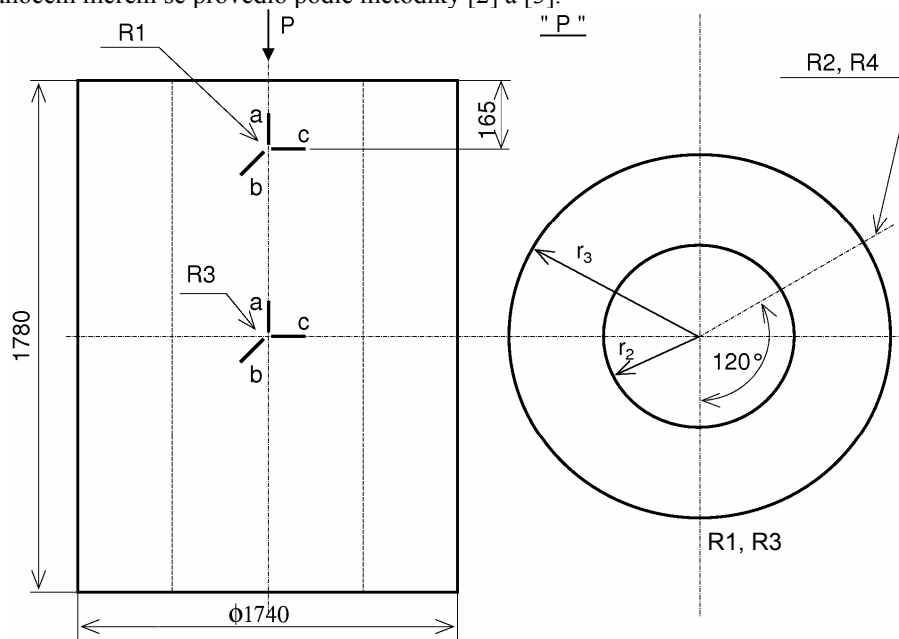
¹ prof. Ing. Pavel MACURA, DrSc., KPaP, VŠB-TU Ostrava, pavel.macura@vsb.cz

² Ing. Zdeněk BEMBENEK, CSc., Ing. Bronislav MOLINEK, DEVIMEX s.r.o., Ostrava,
Lektoroval: Dr.h.c. prof. Ing. František TREBUŇA, CSc., KAMaM, SJF TU v Košiciach,
frantisek.trebuna@tuke.sk

ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ V BANDÁŽI PO TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ

Měření zbytkových napětí v bandáži, po tepelném zpracování stojící, se provedla ve čtyřech místech, jejichž poloha je patrna z obr. 1. Růžice R1 a R2 byly nalepeny poblíž horního okraje bandáže, růžice R3 a R4 pak uprostřed délky bandáže. Obvodový úhel mezi svislými řezy, vedený růžicemi R1-R3 a R2-R4 byl 120° . Rozměry bandáže jakož i označení poloměrů pro teoretické výpočty je rovněž uvedeno v obr. 1.

K měření se použila odvrtávací metoda pomocí vrtacího přípravku RS 200 firmy VISHAY. Uvolněné deformace se měřily statickou tenzometrickou aparaturou P 3500 s přepínačem měřicích míst SB10 téže firmy. Lepily se tenzometrické růžice typu RY 61-1,5/120S od firmy Hottinger, průměry vrtaných otvorů byly 1,6 mm, vrtaná hloubka rovněž 1,6 mm. Vyhodnocení měření se provedlo podle metodiky [2] a [3].



Obr.1 Umístění tenzometrických růžic a orientace mřížek tenzometrů na bandáži

Výsledky měření a vyhodnocení zbytkových napětí při odvrtání plné hloubky jsou přehledně uvedeny v tabulce 1.

Zbytková napětí na vnějším povrchu bandáže před nalisováním

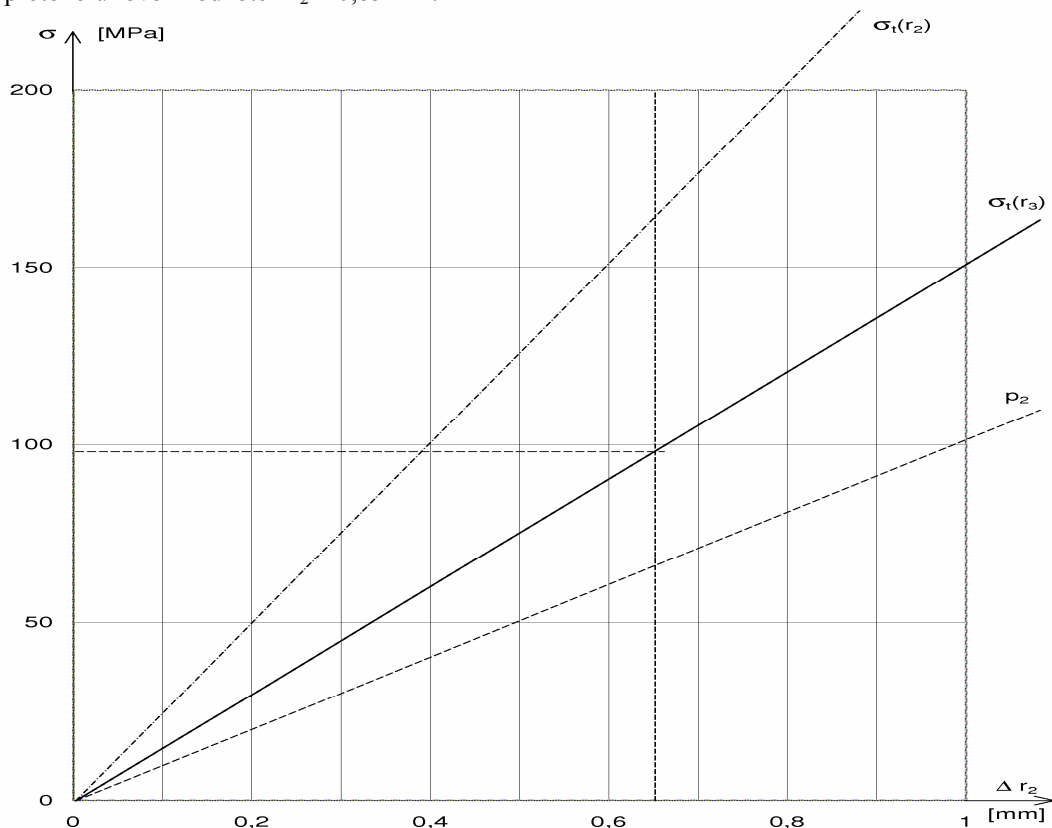
Tabulka 1

Místo	ε_a	ε_b	ε_c	σ_1	σ_2	α	$\sigma_a \equiv \sigma_o$	$\sigma_c \equiv \sigma_t$	σ_{red}
-	μS	μS	μS	MPa	MPa	$^\circ$	MPa	MPa	MPa
R1	94	116	107	-141	-160	-34	-147	-154	-152
R2	80	194	242	-193	-290	-11	-197	-286	-256
R3	124	125	105	-164	-180	114	-177	-166	-172
R4	144	215	206	-234	-290	-26	-245	-280	-267

Zde jsou nejdříve udány hodnoty změřených uvolněných poměrných deformací na jednotlivých tenzometrech různice a dále pak vyhodnocená hlavní napětí σ_1 a σ_2 . Směry těchto hlavních napětí udává úhel α , který je nutno vynést od směru mřížky tenzometru \underline{a} různice ve směru pohybu hodinových ručiček, záporný úhel pochopitelně opačně. Dále jsou v tabulce uvedeny hodnoty zbytkových napětí ve směru mřížky tenzometru \underline{a} σ_a , což je zbytkové napětí ve směru podélné osy bandáže σ_o , a zbytkové napětí ve směru mřížky tenzometru \underline{c} , což je zbytkové napětí ve směru tečny k obvodu bandáže σ_t . V posledním sloupci tabulky 1 jsou uvedeny hodnoty redukováných zbytkových napětí, vyhodnocených podle pevnostní hypotézy HMM.

TEORETICKÉ ŘEŠENÍ NAPĚTÍ OD NALISOVÁNÍ

Procesem bandážování vzniknou jak v bandáži, tak i ve válci napětí, které je možno řešit na základě teorie tlustostěnných nalisovaných nádob. Kromě rozměrů bandáže dle obr. 1 je nutno znát materiálové moduly pružnosti v tahu E a skutečný přesah, který byl podle rozměrového protokolu roven hodnotě $\Delta r_2 = 0,65$ mm.



Obr.2 Závislost napětí v bandáži po nalisování s přesahem Δr_2

Obvodové napětí na vnějším povrchu bandáže je dáno vztahem

$$\sigma_t(r_3) = \frac{Er_2}{r_3^2} \Delta r_2 = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 567,5}{870^2} \cdot \Delta r_2 = 149,95 \cdot 0,65 = 97,5 \text{ MPa} . \quad (1)$$

Pro obvodové napětí na vnitřním povrchu bandáže platí

$$\sigma_r(r_2) = E \frac{r_3^2 + r_2^2}{2r_2 r_3^2} \Delta r_2 = 251,2 \cdot 0,65 = 163,3 \text{ MPa} . \quad (2)$$

Tlak mezi bandáží a válcem pak má velikost

$$p_2 = E \frac{r_3^2 - r_2^2}{2r_2 r_3^2} \Delta r_2 = 101,23 \cdot 0,65 = 65,8 \text{ MPa} . \quad (3)$$

Grafická závislost těchto napětí na přesahu při nalisování je uvedena na obr. 2.

MĚŘENÍ NAPĚTÍ PO BANDÁŽOVÁNÍ

Po bandážování byl bandážovaný válec položen vodorovně a měření zbytkových napětí se provedlo v těsné blízkosti měřených míst před bandážováním. Použité tenzometrické růžice, vrtací nástroje i postup měření byly naprosto stejné jako při předchozím měření. Výsledky měření jsou přehledně shrnuty v tabulce 2.

Zbytková napětí na vnějším povrchu bandáže po nalisování

Tabulka 2

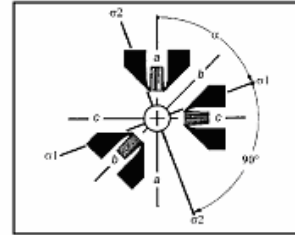
Místo	ε_a	ε_b	ε_c	σ_1	σ_2	α	$\sigma_a \equiv \sigma_o$	$\sigma_c \equiv \sigma_t$	σ_{red}
-	μS	μS	μS	MPa	MPa	°	MPa	MPa	MPa
N1	137	64	6	-71	-144	86	-144	-71	-124
N2	163	132	122	-201	-226	76	-225	-202	-215
N3	145	160	-43	-24	-129	93	-128	-25	-118
N4	188	107	52	-142	-218	85	-218	-142	-192

Naměřené uvolněné poměrné deformace jsou až na jeden případ všechny tahové, což signalizuje přítomnost tlakových napětí v měřených místech. Úhly α jsou blízké hodnotě 90° , což znamená, že algebraicky větší hlavní napětí je přibližně ve směru mřížky tenzometru ε .

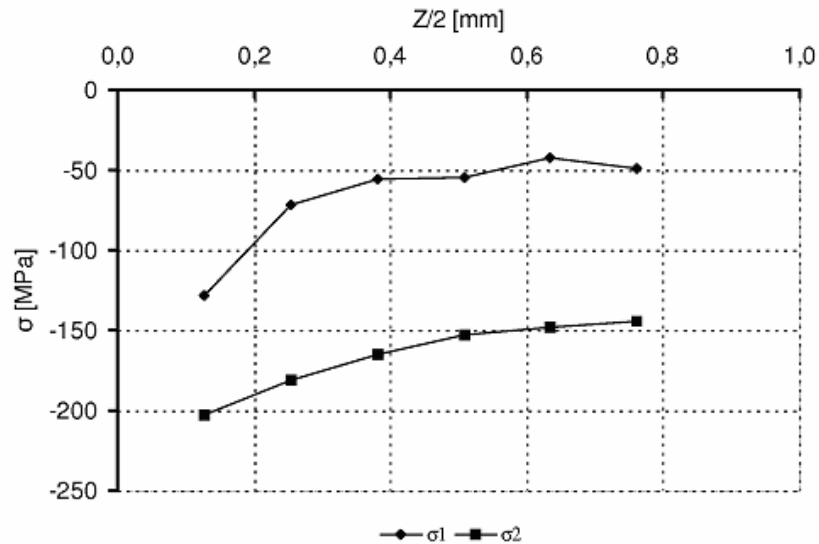
Poslední měření v místě N1 se provedlo při postupném vrtání otvoru, vyhodnocený průběh napětí pod povrchem je uveden formou protokolu na obr. 3, vyhodnocení se provedlo podle metodiky [4].

Vyhodnocení měření zbytkových napětí

Měřicí místo : N1 - Bandáž
 Průměr otvoru : 1,6 mm
 Typ růžice : RY61 1,5/120S
 Materiál : Bandážový
 $E : 2,10E+05$
 $\mu : 0,3$



Z	Z/D	ϵ_a	ϵ_b	ϵ_c	σ_1	σ_2	α	σ_o	σ_t	σ_{red}
mm		μS	μS	μS	MPa	MPa	$^\circ$	MPa	MPa	MPa
0,254	0,050	37	31	19	-128,7	-202,8	99,2	-200,9	-130,6	177,7
0,508	0,100	80	45	17	-71,5	-181,5	86,8	-181,1	-71,8	158,3
0,762	0,149	110	59	14	-56,1	-165,5	88,2	-165,4	-56,2	145,8
1,016	0,199	124	64	15	-54,9	-152,9	87,1	-152,6	-55,2	134,1
1,27	0,249	136	66	1	-42,4	-147,9	88,9	-147,9	-42,5	131,9
1,524	0,299	137	64	6	-48,9	-144,6	86,7	-144,3	-49,2	127,4



VŠB - TU OSTRAVA - FAKULTA STROJNÍ - katedra pružnosti a pevnosti

Obr.3 Výsledná napětí pod vnějším povrchem bandáže po bandážování

ZÁVĚR

V příspěvku jsou stručně shrnuty výsledky měření zbytkových napětí a napětí po bandážování ve čtyřech místech vnějšího povrchu bandáže. I když je počet měřených míst z ekonomických důvodů velmi malý, lze z výsledků měření vyvodit některé zajímavé závěry:

- 1) Přestože je bandáž součást rotačně symetrická, není v ní rozložení zbytkových napětí po tepelném zpracování rovnoměrné. To je názorně vidět z tabulky 1, kdy obvodová zbytková napětí σ_t ve svislém řezu místy R1-R3 dle obr. 1 dosahují tlakových hodnot okolo 160 MPa, zatímco v řezu místy R2-R4 hodnot 280 MPa.
- 2) Bandážováním dojde v bandáži i válci k superpozici zbytkových napětí a napětí od nalisování. Dle teoretických výpočtů by změna obvodového napětí na vnějším povrchu bandáže měla činit 97,5 MPa, skutečně změřené rozdíly napětí v obvodovém i osovém směru v měřených místech jsou uvedeny v tabulce 3. Z ní je vidět, že změna napětí v obvodovém směru poblíž okraje bandáže je přes 80 MPa, zatímco ve střední části bandáže okolo 140 MPa. Změřená změna v napětí v osovém směru je poměrně malá.

Rozdíly osových a obvodových napětí v bandáži po nalisování

Tabulka 3

Místo	R1	R2	R3	R4
$\Delta \sigma_o$	3	14	49	27
$\Delta \sigma_t$	83	84	141	138

- 3) I po bandážování zůstávají hlavní napětí na vnějším povrchu bandáže tlaková.

LITERATURA

- [1] MACURA, P. a kol.: *Zbytková napětí jako parametr kvality výrobků*. Hutnické listy, září 2002, roč. 57, č. 9, s. 22-28. ISSN 0018-8069
- [2] ASTM E 837 - 01. *Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. Americká norma pro měření zbytkových napětí.
- [3] DATENBLATT D 24.32.0. Bohrllochrosette RY 61 mit Zentrier – und Bohrhilfe. Firemní materiál fy Hottinger
- [4] TECH NOTE TN-503-5. Measurement of Residual Stresses by the Hole – Drilling Strain Gage Method. Firemní materiál fy Vishay.
- [5] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F.: *Kvantifikácia zvyškových napätí tenzometrickými metódami*. Grafotlač, Prešov, 2005. 134 str., ISBN 80-8073-227-2