

Kazimierz KRÓL¹
Marek KOWALIK²
Marian SZCZERBA³

PROSTOWANIE PRECYZYJNE WAŁÓW PRZEZ NAGNIATANIE NIERÓWNOMIERNE

Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych nad wpływem nagniatania nierównomiernego wałów na ich precyzyjne prostowanie lub krzywienie.

PRECISION STRAIGHTENING OF SHAFTS BY SHEARINELY BURNISHING

This article presents results of experimental studies on the effects of uneven shaft burnishing and their precise straightening or frown.

1. WSTĘP

Niniejszy artykuł zawiera wyniki badań nad efektywnością prostowania precyzyjnego wałów. Skrzywienie wału jest wynikiem działania naprężeń własnych, które powstają w procesie wytwarzania lub nadmiernych obciążeniach w czasie eksploatacji. Kształt geometryczny wałów z osią prostoliniową i wałów korbowych, pracujących w maszynach wysokoobrotowych lub silnikach, musi spełniać wysokie wymagania. Na przykład, bicie wzajemne czopów wałów precyzyjnych nie może przekraczać $0,004 \div 0,006$ mm, a bicie wzajemne czopów głównych wałów korbowych nie może przekraczać $0,02 \div 0,05$ mm [1]. Nierównomierne nagniatanie ma na celu wprowadzenie po stronie wklęsłej skrzywionego wału naprężeń własnych ściskających, które spowodują:

- a) wyprostowanie wału,
- b) zwiększenie trwałości zmęczeniowej.

Autorzy przeprowadzili badania eksperymentalne nad efektywnością prostowania precyzyjnego wałów za pomocą nagniatania nierównomiernego.

¹ Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, 26-600 Radom; ul. Krasickiego 54.
tel: + 48 48 361-71-29, Fax: + 48 48 361-71-32, e-mail: krol_kazimierz@tlen.pl

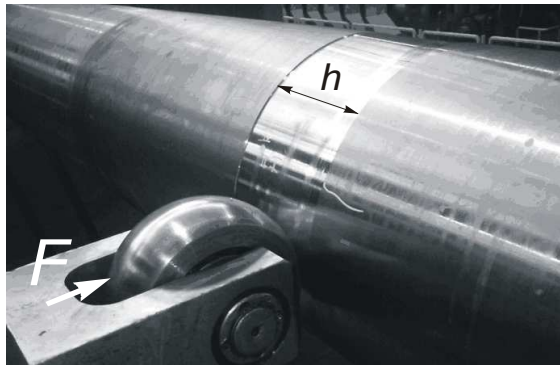
² Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, 26-600 Radom; ul. Krasickiego 54.
tel: + 48 48 361-, Fax: + 48 48 361-, e-mail: mrkwalik@epf.pl

³ Huta „CELSA”, Ostrowiec Świętokrzyski, ul. Jana Samsonowicza 2.
tel: +48 41 249 23 00; e-mail: mszczerba@celsa.com

2. WYNIKI EKSPERYMENTU

Wykonano nagniatanie nierównomierne na dwóch wałach:

1. Wał ze stali 34CrNiMo6 (rys. 1) o średnicy $D_{2,1} = 292,4$ mm i długości $l = 3700$ mm, nagniatany za pomocą rolki o średnicy $D_{1,1} = 142,5$ mm z zaokrągleniem o promieniu $R_{1,2} = 52$ mm. Rolka była dociskana do wału siłą $F = 20,1$ kN. Wał zamocowany w tokarce wykonywał w tym czasie obrót wokół własnej osi o 180° , po czym następowało przesunięcie wzdłużne rolki o 1 mm i włączany był przeciwny kierunek obrotów. W wyniku takiej obróbki na wale była nagnieciona powierzchnia półcyindra o wysokości h . Wykonano sześć prób otrzymując nagniecone półcyndry o wysokości $h_1 = 7,4$ mm; $h_2 = 7,3$ mm; $h_3 = 7$ mm; $h_4 = 7$ mm; $h_5 = 8,5$ mm i $h_6 = 9,4$ mm. Po pierwszych czterech próbach wał skrzywił się odpowiednio o 0,03 mm; 0,06 mm; 0,08 mm; 0,09 mm. Wartości są podane jako skumulowane skrzywienie z prób 1 do 4. W próbach 5 i 6 wał był prostowany. Wyniki pomiarów zamieszczone są w tabeli 1.
2. Wał ze stali St3 o średnicy $D_{2,1} = 38,8$ mm i długości $l = 358$ mm, nagniatany za pomocą rolki o średnicy $D_{2,1} = 108$ mm z zaokrągleniem o promieniu $R_{2,1} = 4,5$ mm. Rolka (dwustronnie stożkowa z zaokrągleniem w miejscu styku stożków) była dociskana do wału siłą $F = 5$ kN. Wał zamocowano mimośrodowo, tzn. oś obrotu wału była przesunięta względem osi obrotu wrzeciennika tokarki. W wyniku takiego kształtowania na obwodzie $w = 59$ mm (ok. 175°) była nagnieciona nierównomiernie powierzchnia o wysokości $h_1 = 27$ mm. Po nagniataniu wał skrzywił się trwale o 0,2 mm.



Rys.1. Proces nagniatania wału o średnicy $D_{2,1} = 292,4$ mm i długości $l = 3700$ mm za pomocą rolki o średnicy $D_{1,1} = 142,5$ mm z zaokrągleniem o promieniu $R_{1,2} = 52$ mm

Tab.1. Wyniki z sześciu zestawów operacji nagniatania wału o średnicy $D_{2,1} = 292,4\text{mm}$

Nr próby	Opis próby nagniatania	Skrzywienie, f , mm	Zbliżenie stykających się ciał, δ	Wysokość strefy nagniatanej, h , mm
1	8 cykli obrotu wału o 180° z nawrotem $0^\circ-180^\circ-0^\circ$ (4 w lewo i 4 w prawo)	0,03 (skrzywienie)	0,07	7,4
2	8 cykli obrotu wału o 180° z nawrotem $0^\circ-180^\circ-0^\circ$ (4 w lewo i 4 w prawo)	0,06 (skrzywienie)	0,06	7,4
3	8 cykli obrotu wału o 180° z nawrotem $0^\circ-180^\circ-0^\circ$ (4 w lewo i 4 w prawo)	0,08 (skrzywienie)	0,06	7,4
4	8 cykli obrotu wału o 180° z nawrotem $0^\circ-180^\circ-0^\circ$ (4 w lewo i 4 w prawo)	0,09 (skrzywienie)	0,03	7
5	8 cykli obrotu wału o 180° z nawrotem $180^\circ-360^\circ-180^\circ$ (4 w lewo i 4 w prawo)	0,06 (prostowanie)	0,06	8,5
6	8 cykli obrotu wału o 180° z nawrotem $180^\circ-360^\circ-180^\circ$	0,02 (prostowanie)	0,04	9,4

3. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

Posługując się wzorami (1) – (4) Hertza [2] dla przypadku kontaktu dwóch ciał: rolki 1 i wału 2 z głównymi promieniami krzywizny $r_1 = 71,25\text{ mm}$; $r_1' = 52\text{ mm}$; $r_2 = 146,2\text{ mm}$ oraz $r_2' = \infty$, wykonanych z materiałów z modułami sprężystości podłużnej E_1 , E_2 i liczbami Poissona ν_1 i ν_2 wyznaczmy większą a i mniejszą b półoś eliptycznego obszaru styku oraz wartość największego ciśnienia na powierzchni styku p_{\max} .

Zredukowany promień krzywizny [2]

$$m = \frac{4}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_1'} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_2'}} = 99,74\text{ mm}. \quad (1)$$

Zredukowana sprężystość:

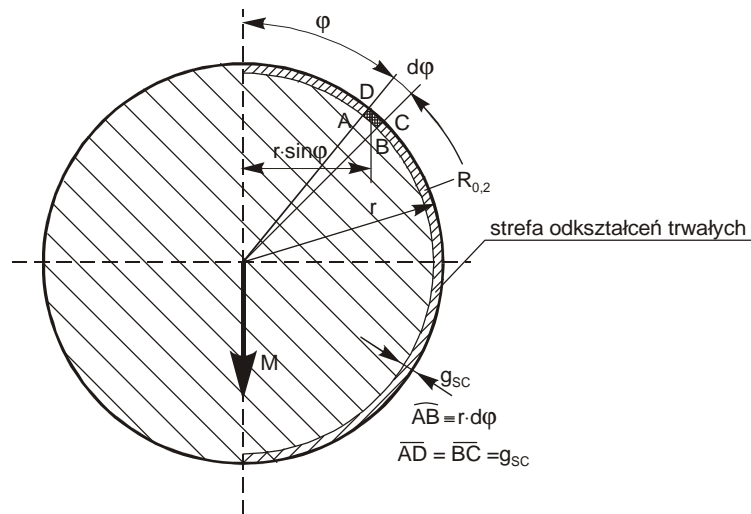
$$n = \frac{8}{3} \cdot \frac{E_1 E_2}{E_1 (1 - \nu_2^2) + E_2 (1 - \nu_1^2)} = 307692\text{ MPa}. \quad (2)$$

$$A^* = \frac{2}{m} = 0,02. \quad (3)$$

$$B^* = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1'}\right)^2 + \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_2'}\right)^2 + 2\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1'}\right)\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_2'}\right)\cos 2\varphi} = 8,22 \cdot 10^{-4}, \quad (4)$$

gdzie φ jest kątem między odpowiadającymi sobie płaszczyznami krzywizn głównych rolki i wału ($\varphi = 90^\circ$).

Przy ilorazie $B^*/A^* = 0,04$ otrzymujemy współczynniki $\alpha = 1,03$ i $\beta = 0,97$. Półosie eliptycznego obszaru styku $a = 0,070 \cdot (F)^{1/3}$; $b = 0,067 \cdot (F)^{1/3}$. Wzajemna zmiana odległości rolki i wału $\delta = 9,46 \cdot 10^{-5} \cdot P^{2/3}$. Wg danych z tabeli 1, przy pierwszym zestawie operacji $\delta = 0,07$ mm, tzn., że siła docisku rolki do wału $F = 20,1$ kN. Przy takiej wartości siły P półosie elipsy mają $a = 1,9$ mm; $b = 1,82$ mm. Największe ciśnienie na powierzchni styku wynosi $p_{\max} = 2775$ MPa.



Rys.2. Przekrój poprzeczny wału z półpięścieniową strefą odkształceń trwałych

Podczas nagięcia w przekroju poprzecznym wału powstanie półpięścień (rys.2) o wysokości h i grubości g_{sc} . Przyjmując założenie upraszczające, że w tym obszarze występują naprężenia niewiele przekraczające granicę plastyczności (umowną granicę plastyczności) $R_{0,2}$ wyznaczmy moment M równoważący trwałe skrzywienie (wyprostowanie) wału f .

$$M = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} R_{0,2} \cdot g_{sc} \cdot r^2 \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi = \frac{1}{2} R_{0,2} \cdot g_{sc} \cdot D_{2,1}, \quad (5)$$

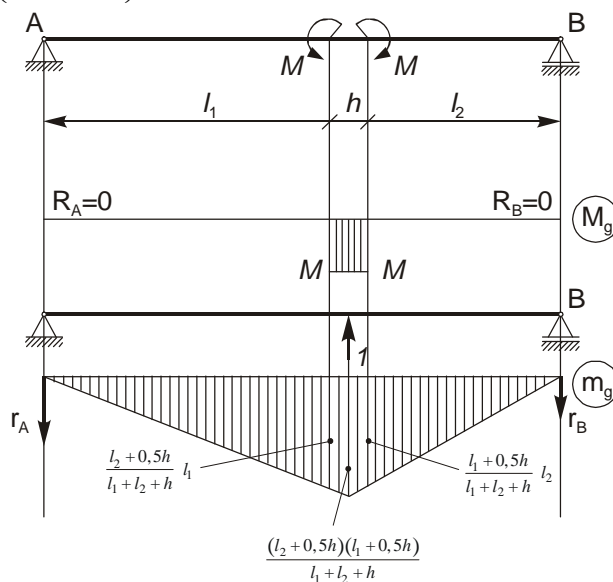
gdzie g_{sc} oznacza głębokość zalegania naprężeń $R_{0,2}$.

Strzałkę ugięcia f wału momentem M (rys.3) obliczamy ze wzoru (6) lub (7):

$$f = \frac{M h}{4E_2 J} \cdot \frac{4l_1 l_2 + 1,5hl_1 + 1,5hl_2 + 0,5h^2}{l_1 + l_2 + h}, \quad (6)$$

Przy czym symbolem J oznaczono osiowy centralny moment bezwładności przekroju po-

przecznego wału $\left(J = \frac{\pi D_{2,1}^4}{64} \right)$.

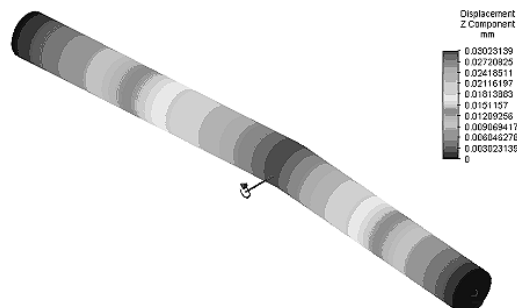


Rys.3. Schemat obliczeniowy dla wyznaczenia ugięcia belki spowodowanego samorzównoważonym momentu M

Uwzględniając (5) i (6) otrzymamy:

$$f = \frac{8R_{0,2}g_{sc}h}{\pi E_2 D_{2,1}^2} \cdot \frac{4l_1l_2 + 1,5hl_1 + 1,5hl_2 + 0,5h^2}{l_1 + l_2 + h} \quad (7)$$

Podstawiając $R_{0,2} = 750 \text{ MPa}$; $h = 7,4 \text{ mm}$; $E_2 = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$; $D_{2,1} = 292,4 \text{ mm}$; $l_1 = 2147,5 \text{ mm}$; $l_2 = 1545,1 \text{ mm}$; $f = 0,03 \text{ mm}$ otrzymujemy przybliżoną głębokość załęgania naprężeń równych granicy plastyczności $g_{sc} = 10,09 \text{ mm}$. Moment M powodujący trwale skrzywienie (prostowanie) $f = 0,03 \text{ mm}$ wynosi $M = 323,5 \text{ kNm}$ (rys. 4).



Rys.4. Wynik analizy numerycznej skrzywienia wału o średnicy $D_{2,1} = 292,4$ mm samowznoważonym momentem $M = 323,5$ kNm na długości $h = 7,4$ mm

4. WNIOSKI

Z rezultatów eksperymentu wynika, że zjawisko krzywienia i prostowania wału przez nagniatanie nierównomierne wystąpiło w każdej z sześciu prób nagniatania tab. 1). Należy podkreślić, że wysokość nagniatanego półcyindra na wale była mała, tzn. wielokrotnie mniejsza od długości promieniowych podcięć stosowanych w wałach korbowych silników dużej mocy w miejscu przejściu od czopa do ramienia (korby). Wartość skrzywienia lub wyprostowania można zwiększyć przez wydłużenie strefy nagniatanej.

Wg obliczeń przeprowadzonych zgodnie ze wzorami Hertza wartość siły, z jaką nagniatano wał, wyniosła około 20,1 kN. To znaczy, że podczas naciskania rolką wał miał globalnie ugięcie sprężyste 0,124 mm, a naprężenia od globalnego zginania wału wynosiły 5,4 MPa.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Емельянов В.Н. *Прецизионная правка деталей машин поверхностным пластическим деформированием*. –В. Новгород: НовГУ им. Я.Мудрого, 2000.
- [2] Jakubowicz A., Orłoś Z.: *Wytrzymałość materiałów*, Warszawa, WNT 1978.