

## MODELOWANIE POSZCZEGÓLNYCH OPERACJI PROCESU TECHNOLOGICZNEGO WYTWARZANIA WAŁÓW

WITOLD HAŁAS<sup>1</sup>, GEORGIJ TARANENKO<sup>2</sup>,  
WIKTOR TARANENKO<sup>3</sup>, ANTONI ŚWIC<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Chełmie e-mail: whalas@pwsz.chelm.pl

<sup>2</sup> Sewastopolski Narodowy Uniwersytet Techniczny (Ukraina) e-mail: ernoteh@mail.ru

<sup>3</sup> Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, Politechnika Lubelska  
e-mail: w.taranenko@pollub.pl, a.swic@pollub.pl

**Streszczenie.** W referacie rozpatruje się zagadnienie dotyczące systemowego podejścia do modelowania i sterowania dokładnością obróbki skrawaniem części osiowosymetrycznych w każdym procesie technologicznym, jako jednolitym systemie, łączącym wiele różnych operacji. Przytacza się wyniki badań oraz matematyczne modele operacji obróbki cieplnej, frezowania rowków wpustowych, szlifowania, uwzględniające postawienie naprężeń szczątkowych na tych operacjach oraz ich wpływ na dokładność i eksploatacyjne charakterystyki wytwarzanego wału jako gotowego wyrobu.

### 1. WSTĘP

Proces technologiczny wytwarzania części typu „wał” jest zestawieniem operacji tokarskich, frezerskich, szlifierskich i wiertarskich, a także operacji obróbki cieplnej, które są charakterystyczne dla wszystkich typów produkcji. Jedną z dróg kompleksowego rozwiązania zagadnienia sterowania obróbką toceniem okazuje się rozpatrzenie procesu technologicznego wykonania części jako jednolitego systemu, łączącego wiele różnych operacji. Optymalne rozwiązanie zagadnienia może być osiągnięte drogą określenia optymalnych wartości sterowanych parametrów technologicznych oraz zbudowania optymalnej kolejności i struktury operacji w procesie technologicznym (PT). Do rozwiązania postawionego zagadnienia należy zbudować model matematyczny każdej operacji.

### 2. MODELOWANIE OPERACJI OBRÓBKI CIEPLNEJ

Rozpatrując układ technologiczny jako obiekt sterowania w operacjach obróbki cieplnej (rys. 1a) w ogólnym przypadku model matematyczny możemy przedstawić za pomocą równania:

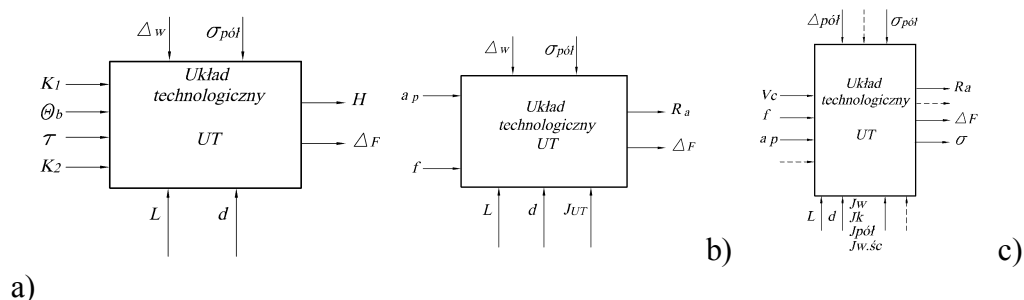
$$\bar{X}^{wyj} = f(\bar{X}^{wej}), \bar{X}^{wej} = (L, d, \Delta_w, \sigma_{pol}, K_1, \theta_b, \tau, K_2), \bar{X}^{wyj} = (\Delta_F, H), \quad (1)$$

gdzie:  $L, d$  - długość i średnica półfabrykatu, zmienne pozwalające uwzględnić różnorodność części,  $H$  - twardość uzyskana po obróbce cieplnej.  $\Delta_F$  - błąd kształtu w przekroju wzdłuż-

nym, spowodowany odkształceniami termicznymi,  $\Delta_w$  - wielkość odkształcenia osi wału przed obróbką cieplną,  $\sigma_{pol}$  - naprężenia szcztkowe w półfabrykacie. Model w postaci:

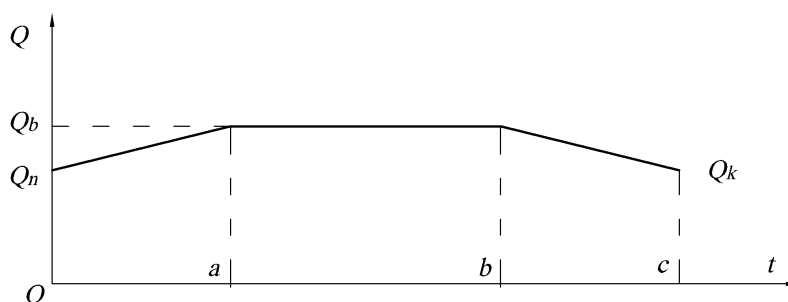
$$\Delta_F = \beta_0 \cdot K_1^{\beta_1} \cdot \theta_b^{\beta_2} \cdot K_2^{\beta_3} \cdot \tau^{\beta_4} \cdot L^{\beta_5} \cdot d^{\beta_6}, \quad (2)$$

otrzymano metodą planowania eksperymentu z zastosowaniem repliki typu  $2^{6-3}$ . Stosując standardową metodę opracowywania danych eksperymentalnych z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów oraz regresywnej analizy, otrzymano współczynniki modelu  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ .



a) Rys. 1. Układy technologiczne jako obiekt sterowania: na operacjach obróbki cieplnej a), na operacji frezowania rowków wpustowych b), na operacji szlifowania c)

Badania w dziedzinie metaloznawstwa i obróbki cieplnej wykazały, że przemiany fazowe materiału kształtują się w zasadzie w maksymalnej temperaturze nagrzania, a wielkość naprężeń wewnętrznych jest funkcją zależności temperatury nagrzania i chłodzenia od czasu. Stan naprężeń pod wpływem temperatur jest opisany równaniami termodynamiki, termosprężystości i termoplastyczności, lecz niedoskonałość opisu analitycznego oraz wrażliwość rozwiązania na wahania stałych termodynamicznych powoduje, że bardziej racjonalny jest opis statystyczny, rozpatrujący proces obróbki termicznej jako obiekt sterowania. Przybliżoną zależność temperatury od czasu w czasie obróbki cieplnej pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Przybliżona zależność temperatury od czasu w czasie obróbki cieplnej

Na odcinku OA zachodzi nagrzanie części, na odcinku AB – wygrzewanie, na odcinku BC – chłodzenie. Ogólna zależność opisana jest następującym równaniem:

$$\theta(t) = \begin{cases} \theta_n + K_1 \cdot t & np0 \leq t < a \\ \theta_b & npua \leq t < b \\ \frac{\theta_b - \theta_k}{c - b} t - \frac{b(\theta_b - \theta_k)}{c - b} & npub \leq t < c \end{cases}, \quad (3)$$

gdzie:  $K_1$  - prędkość nagrzania,  $K_2 = (\theta_b - \theta_k)/(c - b)$ , - prędkość chłodzenia, która zależy od warunków chłodzenia (woda, olej itp.)

Urządzenie do obróbki cieplnej pozwala na regulację następujących parametrów procesu nagrzewanie - chłodzenie:  $K_1$  - prędkość nagrzania,  $\theta_b$  - temperatura wygrzewania (maksymalna temperatura nagrzania),  $K_2$  - prędkość chłodzenia, zależna od warunków chłodzenia,  $\tau = b - a$  czas wygrzewania przy maksymalnej temperaturze.

Obróbce cieplnej (hartowanie, odpuszczanie, normalizacja) półfabrykatów towarzyszy zmiana stanu naprężeń. Proces kształtowania się naprężeń szczątkowych w czasie chłodzenia charakteryzuje się trzema okresami. W początkowym okresie chłodzenia tworzą się naprężenia termiczne uwarunkowane różną prędkością stygnięcia zewnętrznych i wewnętrznych warstw. Te naprężenia osiągają maksimum w czasie osiągnięcia największej różnicy temperatur w przekroju poprzecznym półfabrykatu  $\theta_0$

$$\theta_0 = (\theta_{pocz} - \theta_{sr})(Q_{pow} - Q_c), \quad (4)$$

gdzie:  $\theta_{pocz}, \theta_{sr}$  - odpowiednio, temperatura początkowa chłodzenia półfabrykatu i temperatura otaczającego środowiska,  $Q_{pow}, Q_c$  - kryterium temperatury powierzchni i środka półfabrykatu. W miarę zmniejszenia się różnicy temperatur, wielkość naprężeń termicznych zmniejsza się i w pewnym momencie osiąga wartość zero, a półfabrykat uwalnia się od naprężeń. W czasie dalszego chłodzenia szybkość chłodzenia środka jest większa od prędkości chłodzenia powierzchni, dlatego tworzą się naprężenia przeciwnego znaku, które wzrastają do momentu całkowitego schłodzenia i pozostają w półfabrykacie. - na powierzchni ściskające, a w środku rozciągające. Ogólną przyczyną odkształceń półfabrykatów w czasie obróbki cieplnej okazują się nierównomierne odkształcenia termiczne, a także odkształcenia uwarunkowane naprężeniami fazowymi. Te drugie powstają w materiałach w czasie przemian fazowych. Odpuszczanie następujące po hartowaniu albo ulepszanie porządkuje strukturę materiału i w sposób istotny zmniejsza naprężenia fazowe.

W związku z tym, że materiały mają ograniczoną przewodność cieplną, chłodzenie i odkształcenia termiczne przebiegają praktycznie równocześnie, to znaczy w dowolnym momencie każda elementarna cząsteczka części w przekroju ma takie względne odkształcenie, które odpowiada statycznej równowadze układu przy danym chwilowym rozkładzie temperatur.

Osiowe naprężenia szczątkowe w warstwie elementarnej w dowolnej chwili określa się równaniem [1]:

$$\sigma = E[\varphi_{y+k} - \alpha_1 \cdot \varphi(y)], \quad (5)$$

gdzie:  $\varphi_{y+k}$  parametry kształtu w punkcie wyjściowym w ogólnej postaci,  $\varphi(y)$  - funkcja rozkładu temperatury w przekroju,  $\alpha_1$  - współczynnik zależny od temperatury.

Rozkład temperatury w przekroju w czasie studzenia materiału określony jest kryterium temperatury Fourier  $F_0$  [2]. Jeżeli kryterium  $F_0 \geq 0,3$ , to temperatura, a więc i naprężenia osiowe, rozkładają się w przekroju wg krzywej parabolicznej drugiego stopnia, wówczas ma miejsce tak zwany regularny reżim temperaturowy. Oprócz osiowych, w czasie stygnięcia części cylindrycznych powstają naprężenia promieniowe i styczne. W granicach odkształceń sprężystych można zapisać następujące równania:

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_T + \sigma_L)], \\ \varepsilon_T &= \frac{1}{E} [\sigma_T - \mu(\sigma_r + \sigma_L)], \\ \varepsilon_L &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_r + \sigma_T)],\end{aligned}$$

gdzie:  $\varepsilon_r, \varepsilon_T, \varepsilon_L$  - promieniowe, osiowe i styczne naprężenia szcztkowe.

Promieniowe i styczne naprężenia szcztkowe wywołują odkształcenia szcztkowe powiększające wymiary półfabrykatu w przekroju poprzecznym. Odkształcenia wzdłużne określone są osiowymi naprężeniami szcztkowymi. Osiowe naprężenia szcztkowe w przekroju półfabrykatu określone są zależnością [2, 4]:

$$\sigma_L = \left(1 - \frac{3x^2}{2d^2}\right) \frac{\beta E \theta_0}{3}, \quad (6)$$

gdzie:  $\beta$  - współczynnik rozszerzalności liniowej. Wówczas siła wzdłużna wywołana naprężeniami osiowymi jest określona:

$$F = -\frac{2\beta E \theta_0 d}{3}. \quad (7)$$

Przyjmując dla stali  $\beta E = 2,4 \frac{N}{m^2 K}$ ,  $\theta_0 = \Delta\theta \cdot K_3 \cdot \frac{\alpha_2}{\lambda_1} \cdot d$ ,  $K_3$  - współczynnik proporcjonalności, dla stali  $K_3 = 0,35$ ,  $\alpha_2$  - współczynnik oddawania ciepła,  $\lambda_1$  - współczynnik przejmowania ciepła,  $\Delta\theta = \theta_{pocz} - \theta_{sr}$ ,  $\Delta Q = Q_{pow} - Q_c$ . Podstawiając te wyrażenia do wzoru (7), otrzymano:

$$F = 0,56 \cdot \alpha_2 \cdot \Delta\theta \cdot d / \lambda_1. \quad (8)$$

Siła osiowa  $F$  jest równomiernie rozłożona w przekroju półfabrykatu. Przy obliczeniach odkształceń przyjęto, że półfabrykat jest poddany obróbce cieplnej z początkową niedokładnością kształtu w przekroju wzdłużnym. Równanie linii ugięcia osi wału przed obróbką cieplną:

$$y_l = \Delta_w \cdot \sin \frac{\pi x}{L}, \quad (9)$$

gdzie:  $\Delta_w$  - wielkość ugięcia osi wału przed obróbką cieplną,  $x$  - bieżąca współrzędna.

W czasie obróbki cieplnej pod wpływem działania siły wał ugina się. Równanie linii ugięcia osi wału ma postać:

$$EI \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x), \quad (10)$$

gdzie:  $y$  - wielkość dodatkowego ugięcia osi wału po obróbce cieplnej w odległości  $x$  od początku układu współrzędnych. Moment zginający pochodzący od siły osiowej jest określony jako:

$$M(x) = F \cdot \left( y + \Delta_w \cdot \sin \frac{\pi x}{L} \right). \quad (11)$$

Po rozwiązaniu równania (10) z uwzględnieniem wyrażenia (11) oraz uwzględniając, że  $F_k = \pi^2 \cdot EI / L^2$  - siła krytyczna określająca stateczność układu (krytyczna siła Eulera), otrzymano wyrażenie na odkształcenie wału w czasie obróbki cieplnej:

$$\Delta_{Ter} = \frac{\Delta_w}{1 - F / F_k}, \quad (12)$$

uwzględniając wyrażenie (8) ostatecznie uzyskano:

$$\Delta_{Ter} = \Delta_w \cdot \frac{EI \cdot \lambda_1}{EI \cdot \lambda_1 - 0,56 \cdot \Delta \theta \cdot L^2 \cdot d \cdot \alpha_2}. \quad (13)$$

Model matematyczny obróbki cieplnej może być zapisany w postaci:

$$\Delta_F = \Delta_w \cdot \left( 1 + \frac{EI \cdot \lambda_1}{EI \cdot \lambda_1 - 0,56 \cdot \Delta \theta \cdot L^2 \cdot d \cdot \alpha_2} \right). \quad (14)$$

Przeprowadzona analiza otrzymanych wyrażen oraz badania analityczne wykazały, że wielkość odkształcenia wałów można określić jeszcze na etapie opracowywania procesu technologicznego, w związku z tym można zalecić odpowiednie minimalne naddatki na obróbkę.

### 3. MODELOWANIE OPERACJI FREZOWANIA ROWKÓW WPUSTOWYCH

W czasie frezowania rowków wpustowych część ustawiana jest na pryzmach, a siły mocowania przyłożone są naprzeciw punktów podparcia.

Rozpatrując proces technologiczny jako obiekt sterowania w czasie operacji frezowania rowków wpustowych (rys. 1b), parametrami wyjściowymi są wskaźniki charakteryzujące część: chropowatość powierzchni  $R_a$  oraz rzeczywisty błąd kształtu wału  $\Delta_{Ffr}$ .

Parametrami wejściowymi są: zmienne konstrukcyjne – średnica i długość części  $d$ ,  $L$ , sztywność układu technologicznego  $J_{UT}$ ; zmienne sterujące: głębokość skrawania  $a_p$ , posuw  $f$ ; zmienne zakłócające: początkowe skrzywienie osi  $\Delta_w$ , naprężenia szczątkowe w półfabrykacie  $\sigma_{pól}$ .

W ten sposób zmienne charakteryzujące proces mają konkretne wyrażenia i są powiązane ze sobą następującymi zależnościami:

$$\bar{X}^{wyj} = f(\bar{X}^{wej}), \bar{X}^{wej} = (\Delta_w, \sigma_{pól}, a_p, f, d, L, J_{UT}), \bar{X}^{wyj} = (\Delta_{Ffr}, R_a). \quad (15)$$

Wyrażenie na sumaryczną niedokładność w danej operacji może być zapisane w postaci:

$$\Delta_{Ffr} = \Delta_b + \Delta_{moc} + \Delta_{obr} + \Delta_{odk}, \quad (16)$$

gdzie:  $\Delta_b$  - niedokładność bazowania,  $\Delta_{moc}$  - niedokładność mocowania,  $\Delta_{obr}$  - niedokładność związana z oddziaływaniem sił skrawania w czasie obróbki,  $\Delta_{odk}$  - niedokładność wywołana odkształceniami części w wyniku usunięcia naddatku.

Ponieważ ustawienie części przy frezowaniu rowków wpustowych odbywa się na pryzmach i siły mocowania są przyłożone naprzeciw punktów podparcia, dwie pierwsze postaci błędów nie mają wpływu na dokładność kształtu [3].

Model matematyczny można zapisać w postaci:

$$\Delta_{Ffr} = \frac{F \cdot l^3}{EI} - \frac{3 \cdot K \cdot \Delta\theta \cdot \alpha_2 \cdot a_1}{2 \cdot \lambda_1 \cdot d \cdot 10^3}, \quad (17)$$

gdzie:  $F$  - składowa siła skrawania,  $l$  - rozstaw pryzm,  $a_1$  - wielkość usuwanego naddatku,  $\Delta\theta$  - różnica temperatur stygnięcia i otaczającego środowiska,  $K \approx 0,35$  - współczynnik uwzględniający związek pomiędzy wymiarowym kryterium Bio ( $B_i$ ) i kryterium temperatury ( $Q$ ) przy obliczeniach naprężeń szczątkowych w przypadku stali konstrukcyjnych;  $\alpha_2, \lambda_1$  - odpowiednio współczynniki oddawania ciepła i przewodności cieplnej materiału i w przypadku stali konstrukcyjnej  $\alpha_2 / \lambda_1 \approx 2,5$  [3].

Dla części o średnicy  $d = 28\text{mm}$  i długości  $L = 300\text{mm}$  przy wartości składowej siły skrawania  $F = 600\text{N}$  oraz odległości między pryzmami  $l = 250\text{mm}$  wielkość niedokładności obróbki wynosiła  $\Delta_{skr} = 0,59\text{mm}$ . Wielkość niedokładności związana z odkształceniem, przy  $\Delta\theta = 840^\circ\text{C}$  i  $a_1 = 5\text{mm}$ , dla tej samej części wynosiła  $\Delta_{odk} = 0,27\text{mm}$ . Jak wynika z obliczonych wielkości, udział niedokładności kształtu części związanej z odkształceniem w ogólnej niedokładności wynosi 31%.

Przeprowadzono badania doświadczalne pod kątem określenia udziału niedokładności związanej z odkształceniem w czasie frezowania rowka wpustowego w ogólnej niedokładności obróbki. Badania prowadzono na stanowisku frezarki pionowej model 652FZ na próbkach ze stali 45 o wymiarach  $d = 28\text{mm}$ ,  $L = 300\text{mm}$  w ilości 16 sztuk. Przed przeprowadzeniem badań doświadczalnych próbki były normalizowane i podzielone na 4 grupy - według wielkości przesunięcia nakiełków wykonanych w celu przeprowadzenia zewnętrznej obróbki tokarskiej, przy czym wielkości przesunięć przyjmowały wartości: 0, 1, 2 i 3 mm. Obróbkę przeprowadzono frezami palcowymi R6M5 o średnicy 8mm w jednym przejściu. Po obróbce rowka wpustowego dokonano pomiarów kształtu dna rowka i odległości dna rowka od zewnętrznej powierzchni w siedmiu przekrojach wału. W tab. 4.2. przedstawiono wyniki pomiarów [4].

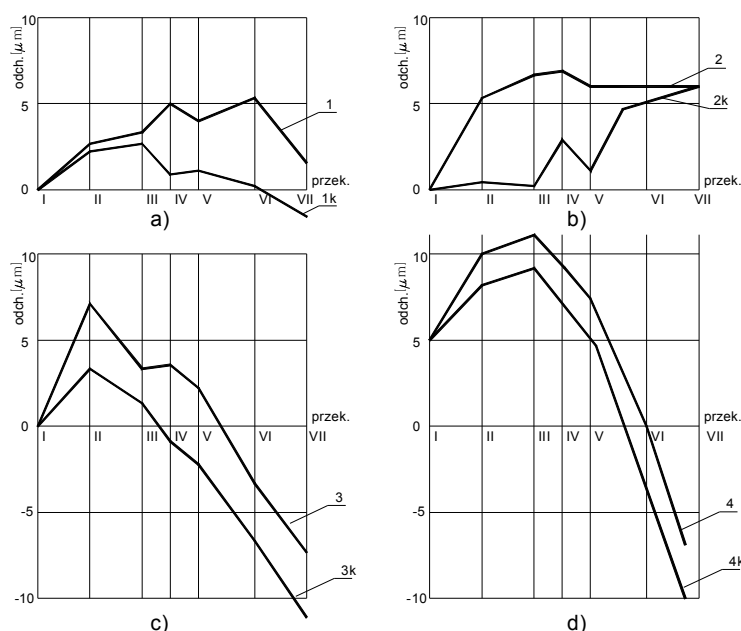
Według uśrednionych wartości wyników badań doświadczalnych odnaleziono zależności odchylenia od rozmieszczenia powierzchni wałów po frezowaniu rowków wpustowych, które przedstawiono na rys. 3 [4].

Analiza otrzymanych wyników wykazuje, że ze wzrostem przesunięcia nakiełków przed poprzedzającą operacją toczenia niedokładność rowka wpustowego, związana z odkształceniem spowodowanym naprężeniami szczątkowymi, wzrasta przy frezowaniu rowków na wypukłej powierzchni wału i maleje przy obróbce na przeciwległej stronie. Przy czym udział niedokładności, związanej z odkształceniem, stale rośnie i osiąga 20% przy przesunięciu nakiełków równym 3 mm.

Po obróbce tokarskiej z przesunięciem naddatku wielkość odkształceń sprężysto-plastycznych nie odpowiada ogólnemu momentowi niezrównoważonych sił wewnętrznych, powstających w czasie usuwania nierównomiernego naddatku, ponieważ materiał posiada wytrzymałość relaksacyjną. Ogólny niezrównoważony moment  $M$  wywołuje odkształcenie sprężyste, zmniejszając poziom wytrzymałości relaksacyjnej  $R$  (rys. 4.).

Tabela 1. Wyniki pomiarów

Nr próbki	Przesunięcie nakiełków [mm]	Odchylenie dna rowka [μm]						Niedokładność położenia dna rowka w stosunku do powierzchni zewnętrznej [μm]						Sumaryczna niedokładność obróbki [μm]								
		0	+5	+2	-2	-7	-9	-6	0	+4	+3	+5	+7	-3	-5	0	+9	+5	+3	0	-12	-11
1.1	0	0	+5	+2	-2	-7	-9	-6	0	+4	+3	+5	+7	-3	-5	0	+9	+5	+3	0	-12	-11
2.2	0	0	+2	+2	+4	+2	-14	-20	0	-5	-6	-6	-21	-17	-21	0	-3	-4	-2	-19	-31	-41
1.3	0	0	+14	+20	+22	+26	+33	+35	0	+6	+12	+15	+19	+26	+30	0	+20	+32	+37	+45	+59	+65
1.4	0	0	+8	+17	+18	+18	+24	+20	0	+8	+15	+18	+20	+26	+25	0	+16	+32	+36	+38	+50	+45
2.1	1	0	+6	+13	+12	+14	+16	+20	0	+8	+9	+4	+2	-1	-17	0	+14	+21	+16	+16	+15	+3
2.2	1	0	+3	+1	+1	0	-1	-5	0	0	0	-1	-3	-2	-6	0	+3	+1	0	-3	-3	-11
2.3	1	0	-1	-3	+5	-5	+5	-8	0	+2	-2	0	0	-4	-11	0	+1	-5	+4	-5	+1	-19
2.4	1	0	+10	+9	+10	+11	+10	+3	0	+6	+6	-1	+6	+7	-5	0	+16	+15	+10	+17	+17	-2
3.1	2	0	+14	+10	+11	+11	-5	0	0	+6	+7	+6	+5	+3	0	0	+20	+17	+17	+16	-2	-16
3.2	2	0	+8	+4	+5	+4	-3	-15	0	+7	+1	-1	-6	-11	-16	0	+15	+5	+4	-2	-14	-31
3.3	2	0	-1	0	0	-4	-6	-2	0	+1	+2	0	-3	-9	-13	0	0	+2	0	-7	-15	-15
3.4	2	0	+8	+6	+4	+1	-5	-20	0	+4	0	-9	-10	-20	-28	0	+12	+6	-5	-9	-29	-48
4.1	3	0	0	-4	-8	-8	-21	-34	0	+6	+1	-5	+8	-18	-30	0	+6	-4	-13	0	-39	-64
4.2	3	0	+20	+45	+48	+48	+42	+22	0	+12	+36	+30	+30	+30	+18	0	+32	+81	+78	+78	+72	+40
4.3	3	0	+14	+8	+8	+4	-3	-8	0	+15	+12	+11	+2	-2	-7	0	+29	+20	+19	+6	-1	-15
4.4	3	0	+5	-6	-12	-14	-19	-20	0	+4	-9	-10	-19	-28	-46	0	+9	-15	-22	-33	-47	-66

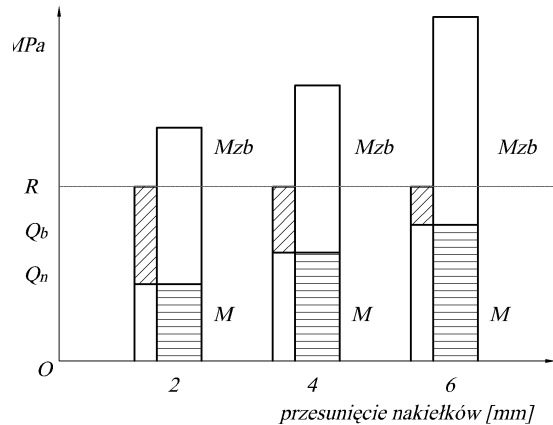


Rys. 3. Odchylenia od rozmieszczenia powierzchni wału po obróbce mechanicznej (gdzie: 1, 2, 3, 4 – niedokładność sumaryczna; 1k, 2k, 3k, 4k – niedokładność związana z odkształceniem) z przesunięciem nakiełków: przesunięcie równe 0 - a), przesunięcie równe 1mm - b), przesunięcie równe 2mm - c), przesunięcie równe 3mm - d).

W następnej obróbce, w tym wypadku w czasie frezowania rowków wpustowych, powstają nowe zbyteczne (niezrównoważone) naprężenia  $M_{zb}$ . Przy nałożeniu się tych naprężeń na utrzymującą się wytrzymałość relaksacyjną (rys. 4.11 kreskowanie ukośne) powstają sprężysto plastyczne odkształcenia: do granicy wytrzymałości relaksacyjnej – sprężyste, za granicą - sprężysto-plastyczne. W ten sposób, jak wynika z rys. 3, oczekiwana

wielkość ogólnego odkształcenia będzie większa przy większym przesunięciu nakiełków lub zwiększeniu bicia nadkładu [5].

W czasie obróbki rowków wpustowych uwzględniono wcześniej przedstawione zalecenia i wypróbowane warianty rozmieszczenia rowków w zależności od ugięcia osi, powstającego w czasie poprzednich operacji. Rowek wpustowy rozmieszczono w dwóch przekrojach: na



Rys. 4. Zależność zmian wpływu wytrzymałości relaksacyjnej na odkształcenie

stronach wypukłej i wklęsłej. Wynika z tego, że rozmieszczenie rowka wpustowego jest najbardziej pożądane na stronie wypukłej, przy którym błąd powstający w poprzednich operacjach zmniejsza się [6].

#### 4. MODELOWANIE OPERACJI SZLIFOWANIA

Rozpatrując proces technologiczny jako obiekt sterowania w czasie operacji szlifowania (rys. 1c), parametrami wyjściowymi są wskaźniki charakteryzujące część: chropowatość powierzchni  $R_a$ , naprężenia szczątkowe  $\sigma$  oraz rzeczywisty błąd kształtu wału  $\Delta_F$ .

Opis matematyczny operacji szlifowania rozpatrywanej jako obiekt sterowania (rys. 1c) przyjmuje postać:

$$\begin{aligned}\bar{X}^{wej} &= (\sigma_0, \Delta_{pól}, a_p, v_c, f, d, L, J_w, J_k, J_{sz}), \\ \bar{X}^{wyj} &= (\Delta_{Fszl}, R_a),\end{aligned}\quad (18)$$

gdzie:  $\Delta_{pól}$  - całkowita wielkość nadkładu na szlifowanie,  $J_{szl}$  - sztywność wrzeciona.

W czasie szlifowania wałów błąd obróbki określony jest głębokością skrawania, a liczba przejść następującym wyrażeniem:

$$\Delta_{szl} = a_p \cdot \frac{A \cdot (A^i - 1)}{A - 1} - K \cdot \Delta_{odk}, \quad (19)$$

gdzie:  $a_p$  - głębokość skrawania,  $i$  - liczba przejść,

$$A = \frac{1}{\frac{(1-x/L)^2 \cdot C}{J_w} + \frac{(x/L)^2 \cdot C}{J_k} + \frac{C}{J_{sz}} + \frac{x^2(L-x)^2 \cdot C}{3E \cdot I}}. \quad (20)$$



Liczbę przejść  $i$  określa się na podstawie rzeczywistego nadatku, który jest równy:

$$N_{rz} = N_z + \Delta_{Ffr}$$

gdzie:  $N_z$  - nadatek na szlifowanie,  $\Delta_{Ffr}$  - niedokładność uzyskana w poprzedniej operacji,

$C$  – stały współczynnik uwzględniający składową siłę skrawania.

Uwzględniając niedokładność powstałą w poprzedniej operacji (4.40), otrzymano:

$$\Delta_{szl} = \Delta_{Ffr} \cdot \left[ 1 + \frac{A(A^i - 1)}{i(A - 1)} - \frac{2\sigma_0 \cdot L^2}{E \cdot R^2} \right]^i \quad (21)$$

Uwzględniając, że przy zwiększeniu liczby przejść wzrasta niedokładność szlifowania, możemy sformułować wniosek, że niedokładność kształtu (ugięcie osi) uzyskana w poprzednich operacjach sprzyja obniżeniu dokładności szlifowania.

W pracy [7] przedstawiono wyniki badań wpływu parametrów szlifowania na stan naprężeń szczątkowych przy szlifowaniu opravek, opisano metodykę i urządzenia do badań eksperymentalnych, opracowano model powstawania naprężeń szczątkowych w części, przeprowadzono randomizację wyników eksperymentów, sprawdzanie ważności współczynników modelu, adekwatności modelu. Otrzymano zależność do obliczenia naprężeń szczątkowych w postaci:

$$\sigma = -329,8 + 8060a_p + 55,82f - 11,33a_p v_c + 0,45v_c - 1241a_p f - 0,07v_c f + 1,77a_p v_c f \quad (22)$$

Na podstawie otrzymanych wyników i analizy równania regresji można sformułować następujący wniosek: wielkość naprężeń szczątkowych powstających w trakcie szlifowania zależy głównie od posuwu. Prędkość obrotowa części okazuje najmniejszy wpływ na naprężenia szczątkowe.

## 5. PODSUMOWANIE

Badania technologii obróbki części o dużej dokładności wykazały, że błędy obróbki w czasie tradycyjnej kolejności operacji kształtują się z określoną cyklicznością. Każdy cykl zawiera operacje skrawania, obróbki cieplnej, frezowania, szlifowania. Po każdym cyklu zachodzi nowe kształtowanie się błędów związane z biciem promieniowym. Otrzymano wzory określające błędy w końcowej obróbce związane z odkształceniem.

Przeprowadzona analiza otrzymanych wyrażeń oraz badania analityczne na operacji obróbki cieplną wykazały, że wielkość odkształcenia wałów można określić jeszcze na etapie opracowywania procesu technologicznego, w związku z tym można zalecić odpowiednie minimalne nadatki na obróbkę.

W czasie obróbki rowków wpustowych uwzględniono wcześniej przedstawione zalecenia i wypróbowane warianty rozmieszczenia rowków w zależności od ugięcia osi, powstającego w czasie poprzednich operacji. Rowek wpustowy rozmieszczono w dwóch przekrojach: na stronach wypukłej i wklęsłej. Wynika z tego, że rozmieszczenie rowka wpustowego jest najbardziej pożądane na stronie wypukłej, przy którym błąd powstający w poprzednich operacjach zmniejsza się.

Z analizy równania regresji wynika, że wielkość naprężeń szczątkowych powstających w trakcie szlifowania zależy głównie od posuwu.

Zastosowanie przedstawionych wyżej zaleceń powoduje zmniejszenie błędów powstających w poprzednich operacjach.

## LITERATURA

1. Константинов Л. С.: Механизм искривления отливок при механической обработке. / Известия Вузов, Машиностроение, 1964, № 1. – С.204 - 209
2. Абрамов В. В.: Остаточные напряжения и деформации в металлах. М.: Машгиз, 1963. – 355 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х томах. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1985. Т.1: - 656 с., Т.2: - 496 с.
4. Halas W., Taranenko V., Świć A. Modelling the accuracy of axialsymmetric shaft manufacturing.. Proceedings 31<sup>th</sup> conference on production engineering of serbia and montenegro 2006 . 19 – 21 September 2006, Kragujevac, Serbia and Montenegro, Kragujevac.2006. – s.305 – 310
5. Halas W., Taranenko V., Swic A., Glinko H.: Experimental resrarch on the extra surplus to the shafts processing accuracy. Автоматизация: Проблемы, Идеи, Решения: Материалы междунар. Научн.-техн. Конф., г. Севастополь, 12-17 сентября 2006 г. - Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. – с. 143 -144
6. Halas W., Taranenko V., Swic A., Taranenko G.: The technological inheritance for shafts processing and recommended order of operations. “Acta Mechanica Slovaca”, Journal published by Faculty of Mechanical Engineering, the Technical University in Kosice, Kosice, 2-A/2008, Ročník 12. pp. 249 – 257
7. Halas W., Taranenko V., Swic A.Taranenko G.: Investigation of influence of grinding regimes on surface tension state. \_ N.T. Nguyen et al. (Eds.): IEA/AIE 2008, LNAI 5027, pp. 749–756, 2008. © Springer – Verlag Berlin Heidelberg 2008.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВАЛОВ

Аннотация. В статье рассматривается системный подход к моделированию и управлению точностью обработки резанием осесимметричных деталей для каждого технологического процесса, как целостной системы различных операций, входящих в этот процесс. Приводятся результаты исследований, математические модели операций термической обработки, фрезерования шпоночных пазов, шлифования, учитывающие механизм появления остаточных напряжений на этих операциях, и их влияние на точность и эксплуатационные характеристики, изготавливаемого вала, как готового изделия.