

## SYSTEMOWE PODEJŚCIE DO MODELOWANIA 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 model matematyczny operacji tokarskiej, uwzględniający postawienie naprężeń szczałkowych na operacji toczenia oraz jej 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 toczeniem 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). Przy rozwiązaniu postawionego zagadnienia należy zbudować model matematyczny każdej operacji.

### 2. WSKAŹNIKI OPERACJI I CZYNNIKI ODDZIAŁUJĄCE NA PROCES WYTWARZANIA. ZAGADNIENIE MODELOWANIA

Ogólne podejście do rozwiązania zagadnienia sterowania i optymalizacji składa się, jak wiadomo, z następujących etapów: sformułowanie celu sterowania i wybór kryterium optymalizacji; określenie ograniczeń; określenie charakterystyk optymalizowanego układu; znajdowanie algorytmu sterowania, zapewniającego osiągnięcie oczekiwanego kryterium optymalizacji.

Poznanie właściwości układu technologicznego (UT), realizującego proces technologiczny (wejście obiektu) wymaga analizy nie tylko bieżących wartości wielkości wejściowych, ale również ich wartości w poprzednich cyklach (w poprzednich operacjach).

Jako zmienne wyjściowe UT rozpatruje się te parametry, które przewiduje się do regulacji w projektowanym układzie sterowania.

W każdej operacji PT wytwarzania części istnieje szereg wskaźników i czynników bezpośrednio lub pośrednio oddziałujących na wynik obróbki (dokładność, chropowatość powierzchni, właściwości fizyko-mechaniczne). UT przedstawia się w postaci sterowanego obiektu (rys. 1a), którego wielkościami wyjściowymi są następujące wskaźniki: wskaźniki charakteryzujące część ( $X^{-wyj}$ ,  $\overline{PC}$ ), w których zawarte są wskaźniki dokładności wymiarów, np.  $A_{\Delta}$  i wskaźniki jakości warstwy wierzchniej, np.  $R_a$ ; wskaźniki charakteryzujące proces obróbki skrawaniem, np. szybkość zużycia narzędzia  $q$ , siła skrawania  $F$ , moc skrawania  $N_{skr}$  oraz inne; kryterium optymalizacji  $Q$ .

Kryterium optymalizacji powinno odzwierciedlać wymaganą jakość wytwarzanych wyrobów przy możliwie minimalnych kosztach własnych. Technologiczne koszty własne części związane są z ekonomicznymi parametrami skrawania, które rozumie się jako okres trwałości narzędzia i odpowiadającą jemu prędkość skrawania przy przyjętych wartościach pomocniczego czasu maszynowego oraz przyjętych wydatkach, przy których koszt operacji będzie najniższy.

Parametrami wejściowymi są następujące grupy zmiennych: zmienne zakłócające ( $X^{-wej}$ ,  $\overline{PC}$ ), do których odnoszą się wskaźniki dokładności wymiarów półfabrykatu, wpływające na obróbkę, np. naddatek  $\Delta_{pól}$  i wskaźniki jakości warstwy wierzchniej

półfabrykatu, np. twardość  $H$ ; zmienne sterujące ( $\bar{Y}$ ), do których zaliczają się parametry obróbki, np. prędkość skrawania  $v_c$ , posuw  $f$ , głębokość skrawania  $a_p$ , wymiar ustawienia statycznego  $A_{st}$ ; zmienne konstrukcyjne, np. średnica  $d$  i długość  $L$  części.

Zmienne zakłócające to z reguły wielkości przypadkowe, których konkretne wartości są nieznane. Stąd sygnał wyjściowy obiektu jest funkcją wielkości przypadkowych, więc on również jest przypadkowy. Dlatego duża liczba trudnych do określenia czynników powoduje, że zależności między sygnałami wejściowym i wyjściowym są przypadkowe.

Analiza procesów zawiera: model matematyczny przyjętej sytuacji fizycznej, szczegółową analizę mającą na celu zbudowanie modelu matematycznego, syntezę i opis wyników w celu pełnego przedstawienia procesu.

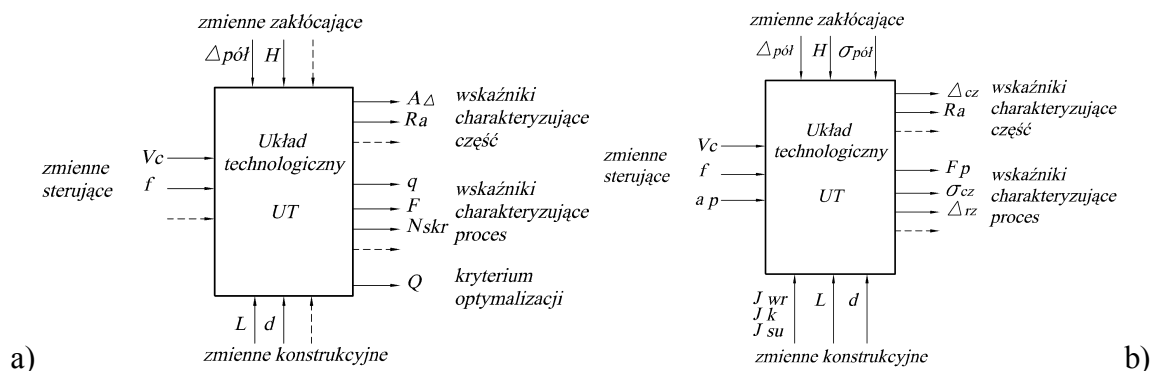
Możliwe są dwa, spośród wielu, podejścia do poznania zjawisk, określenia związku funkcjonalnego między wielkościami wejściowymi i wyjściowymi.

Pierwsze ujęcie – analityczne, oparte na zastosowaniu praw fizycznych (równania Newtona, Maxwella itp.) jest możliwe w przypadkach, kiedy zjawiska są stosunkowo proste lub przedstawiają sobą połączenie zjawisk prostych.

Drugie ujęcie – eksperymentalne. Zadanie naukowca w tym przypadku polega na wyłonieniu hipotezy lub szeregu hipotez, a następnie potwierdzeniu jednej z nich. Wyłonienie hipotez założono na apriorycznej informacji o charakterze badanego zjawiska. Podejście eksperymentalne stosuje się przy opisywaniu zjawisk złożonych, zależnych od wielu czynników.

Procesy w UT są powielane, a więc porównywalne tylko statystycznie. To wyjaśnia się złożonością procesów fizycznych wzajemnego oddziaływania narzędzia i obrabianej części, a także dużą liczbą trudnych do określenia czynników: temperaturą otaczającego środowiska,

temperaturą strefy skrawania, różnorodnością składu chemicznego materiału półfabrykatu, stanem początkowym narzędzia skrawającego, składem zastosowanej cieczy chłodząco - smarującej.



Rys. 1. Układ technologiczny(UT) jako obiekt sterowany – a), układ technologiczny toczenia jako obiekt sterowany – b)

Metoda eksperymentalno – statystyczna nie wyklucza zastosowania modeli analitycznych, np. przy budowaniu modeli wymiarowych.

Konieczne jest rozsądne łączenie metod analitycznych i eksperymentalnych przy modelowaniu, czysto eksperymentalne metody nie mogą być stosowane w razie wysokich kosztów jednostkowych eksperymentu, a czysto analityczne w przypadku niedostatecznej dokładności, np. przy określaniu sił skrawania czy prędkości zużycia narzędzia skrawającego. Proces technologiczny obróbki części typu „wał” przedstawia połączenie tokarskich, frezerskich szlifierskich i wiertarskich operacji oraz operacji obróbki cieplnej, co jest charakterystyczne przy wszystkich typach produkcji. Przeanalizowano modele technologiczne każdej operacji jako sterowane obiekty technologiczne.

### 3. MODELOWANIE POSZCZEGÓLNYCH OPERACJI PROCESU TECHNOLOGICZNEGO

#### 3.1. Modelowanie operacji toczenia

Niedokładność kształtu wału w kierunku wzdłużnym jest dominująca w ogólnej niedokładności obróbki i posiada istotny wpływ na charakterystykę eksploatacyjną części, często na dynamikę maszyny, jej wydajność, niezawodność i żywotność. Przy czym odkształcenie wałów wywołane rozkładem naprężeń obniża jakość wytwarzanych części, o czym świadczą liczne przypadki utraty dokładności względnego położenia powierzchni ujawniające się w czasie montażu, pomimo że po obróbce wykańczającej dokładność odpowiadała oczekiwany wymaganiom.

Badanie właściwości UT realizującego proces toczenia zakłada analizę nie tylko bieżących wartości wielkości wejściowych, ale również wartości w poprzednich cyklach, otrzymanych w poprzedzających operacjach. W analizie UT toczenia jako obiektu sterowanego, parametrami wyjściowymi mogą być (rys. 1,b):

wskaźniki charakteryzujące proces – składowa siły skrawania ( $F_p$ ), naprężenia szczątkowe wewnątrz części ( $\sigma_{cz}$ ), odchyłka od rzeczywistej dokładności części ( $\Delta_{rz}$ ); wskaźniki charakteryzujące część - chropowatość powierzchni ( $R_a$ ), niedokładność kształtu części w kierunku wzdłużnym ( $\Delta_{cz}$ ).

Parametrami wejściowymi są: oddziaływania zakłócające – nierównomierny naddatek półfabrykatu ( $\Delta_{pól}$ ), twardość materiału półfabrykatu ( $H$ ), naprężenia szczątkowe wewnątrz półfabrykatu ( $\sigma_{pól}$ ); zmienne konstrukcyjne – średnica części ( $d$ ), długość części ( $L$ ), sztywność wrzeciona, konika, suportu obrabiarki ( $J_{wr}$ ,  $J_k$ ,  $J_{su}$ ); zmienne sterujące – głębokość skrawania ( $a_p$ ), posuw ( $f$ ), prędkość skrawania ( $v_c$ ), prędkość obrotowa półfabrykatu.

Zgodnie z przyjętymi oznaczeniami, zmienne charakteryzujące proces toczenia przyjmują następującą postać:

$$X^{-wej} = (\sigma_{pól}, H, \Delta_{pól}, d, L, J_{wr}, J_k, J_{su}, v_c, f, a_p), \quad (1)$$

$$X^{-wyj} = (F_p, \sigma_{cz}, \Delta_{rz}, R_a).$$

W postaci ogólnej model matematyczny procesu technologicznego toczenia może być przedstawiony równaniem:

$$X^{-wej} = f(X^{-wyj}). \quad (2)$$

Na dokładność kształtu wału w kierunku wzdłużnym mają wpływ dwa zasadnicze czynniki: wielkość zmiennych sprężystych odkształceń części w czasie usuwania nierównomiernego naddatku oraz odkształcenia wywołane naprężeniami szczątkowymi:

$$\Delta_{rz} = f(\Delta_y, \Delta_\sigma) = \Delta_y + \Delta_\sigma, \quad (3)$$

gdzie:  $\Delta_y$  – niedokładność wywołana sprężystymi odkształceniami części,

$\Delta_\sigma$  – niedokładność pochodząca od naprężeń szczątkowych.

Niedokładność wywołana zmiennymi odkształceniami sprężystymi części w czasie usuwania nierównomiernego naddatku ( $\Delta_y$ ) może być określona jako:

$$\Delta_y = \frac{F_p}{4} \left( \frac{1}{J_{wr}} + \frac{1}{J_k} + \frac{1}{J_{su}} + \frac{16L^3}{3 \cdot \pi \cdot E \cdot d^3} \right), \quad (4)$$

gdzie:  $F_p = C_p \cdot f^{y_p} \cdot a_p^{x_p} \cdot H^n$  – promieniowa składowa siła skrawania,

$E$  – moduł sprężystości materiału półfabrykatu.

W celu obliczenia naprężeń szczątkowych wywołanych momentami zginającymi sił wewnętrznymi w czasie toczenia półfabrykatu z biciem naddatku ( $\Delta_{pól}$ ) należy znać charakter rozkładu naprężeń szczątkowych w przekroju poprzecznym półfabrykatu. Z warunku przewodności cieplnej wynika, że gdy kryterium Fouriera przekracza 0,3, rozkład naprężeń w przekroju przebiega wg krzywej parabolicznej. Regularny reżim temperaturowy ma miejsce we wszystkich przypadkach obróbki cieplnej z wyjątkiem hartowania, chociaż po nim zawsze następuje odpuszczanie, dla którego zachowany jest również reżim temperaturowy. Przedstawiona w literaturze wiedza jest sprzeczna i proponuje inne prawa rozkładu naprężeń szczątkowych w czasie normalizacji. W celu określenia prawa rozkładu naprężeń szczątkowych w przekroju wału przeprowadzono badania na próbkach stali 45 (walcowanie) o średnicy 100 mm i długości 600 mm. Przed badaniami eksperymentalnymi

wały (5 szt.) były normalizowane z zachowaniem przedstawionego reżimu. Wykonano również wzorzec z tego materiału. W celu określenia naprężeń zastosowano prawo Zaksa polegające na jednostronnym warstwowym roztaczaniu, a następnie pomiarze osiowych i stycznych odkształceń.

Przed obróbką otworu przeprowadzono nakiełkowanie próbek nawiertakiem wykonanym z materiału R6M5 z prędkością 0,83 m/s z posuwem ręcznym. W celu zapobieżenia wyboczeniu wiertła na wstępie nawiercano otwory na głębokość 60 mm wiertłem o średnicy 6,7 mm, a następnie wiertłem specjalnym  $\Phi$  6,5 mm na całej długości. Obróbkę otworów przeprowadzano w kilku etapach, naddatek zdejmowano warstwowo. Narzędzie skrawające – wiertła specjalne z ostrzem skrawającym wykonanym z materiału R6M5 o średnicy  $\Phi$  6,5; 12; 17,5; 24; 30; 36; 42; 48 mm. Następnie obróbkę przeprowadzano nożami T15K6 na obrabiarce 2620BFna następujące średnice:  $\Phi$  54; 58; 68; 70; 76; 83 mm, przy czym grubość ścianki po ostatnim przejściu wynosiła 5mm. Parametry obróbki były następujące:  $v_c = 0,58 \dots 0,83 \text{ m/s}$ ,  $f = 0,08 \dots 0,14 \text{ mm/obr}$ .

Obliczenia osiowych i stycznych naprężeń przeprowadzono wg metody [4], wykorzystując podstawową zależność:

$$\sigma_L = \frac{E}{1 - \mu^2} \left[ (F_z - F) \frac{\Delta\lambda}{\Delta F} - \lambda \right], \quad (5)$$

gdzie:  $E$  –moduł sprężystości,  $\mu$  - współczynnik Poissona,

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \Delta\varepsilon + \mu \cdot \Delta\delta, \\ \Delta F &= dF = 2\pi \cdot r \cdot \Delta r, \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie:  $F_z - F = \pi \cdot (r_z^2 - r)$ ,  $r_z$  - średnica zewnętrzna tulei;  $r$  - średnica wewnętrzna tulei;  $\Delta\delta$  - różnica pomiędzy wyjściowym i bieżącym wskazaniem czujnika tensometrycznego;  $\Delta\varepsilon$  - różnica pomiędzy bieżącym i poprzednim wskazaniem czujnika tensometrycznego;  $\Delta r$  - grubość zdejmowanej warstwy.

Obróbkę danych eksperymentalnych przeprowadzono na PC, wartości naprężeń szczytkowych w przekrojach próbek przedstawiono w tab. 1, a na rys. 3 przedstawiono uśrednione zależności rozkładu naprężeń szczytkowych w przekroju próbek.

Jak wynika z wykresów, zarówno osiowe, jak i styczne naprężenia szczytkowe, rozkładają się wg krzywej parabolicznej.

Uwzględniając prawo parabolicznego rozkładu naprężeń szczytkowych w przekroju poprzecznym oraz to, że naprężenia szczytkowe, spowodowane obróbką, nie powodują powstawania dodatkowych momentów, otrzymano zależność określającą oczekiwane odkształcenie wałów w czasie toczenia.

W czasie obliczeń założono, że w półfabrykacie (rys. 4.) ma miejsce jednoosiowy stan naprężeń [1] i naprężenia osiowe w przekroju poprzecznym mają rozkład paraboliczny.

Ponieważ układ naprężeń w dowolnym momencie sam się równoważy, to

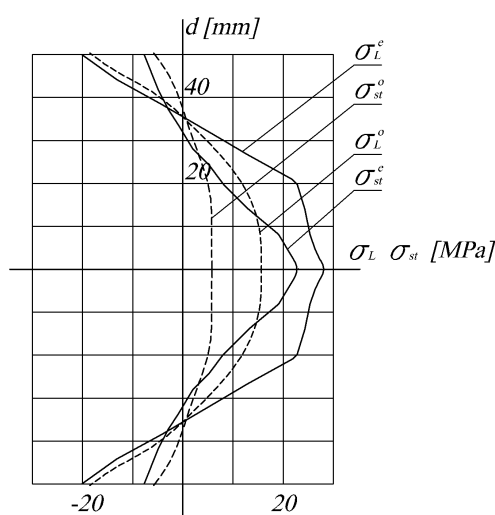
$$\int_0^R \int_0^R \sigma_i \cdot dF = 0. \quad (7)$$

W czasie usuwania z półfabrykatu nierównomiernego naddatku w przekroju części powstaje moment zginający, który można określić jako moment naprężeń na powierzchni pierścienia I, czyli na pozostającej powierzchni przekroju wału II (rys. 4.).

Rys. 4 przedstawia schemat do obliczeń momentów niezrównoważonych sił [7].

Tabela 1. Wartości naprężeń szczytkowych w przekrojach próbek (wyniki obliczeń na PC)

Srednica roztaczania [mm]	Naprężenia osiowe [MPa]	Naprężenia styczne [MPa]
6,5	+25,10	+21,46
17,5	21,00	10,29
30,0	22,10	8,80
42,0	23,0	5,74
48,00	20,90	2,68
58,00	11,0	-3,24
70,0	1,59	-5,47
83,0	-11,76	-8,46
90,0	-18,20	-12,60
93,0	-21,35	-14,83
96,6	-24,56	-17,10
100,0	-27,78	-19,54



Rys. 3. Rozkład naprężeń szczytkowych w przekroju próbek, gdzie:  $\sigma_L^e, \sigma_{st}^e$  - eksperymentalne osiowe i styczne naprężenia szczytkowe,  $\sigma_L^o, \sigma_{st}^o$  - odpowiednio osiowe i styczne naprężenia szczytkowe uzyskane drogą obliczeń

Moment naprężeń działający na elementarne pole przekroju

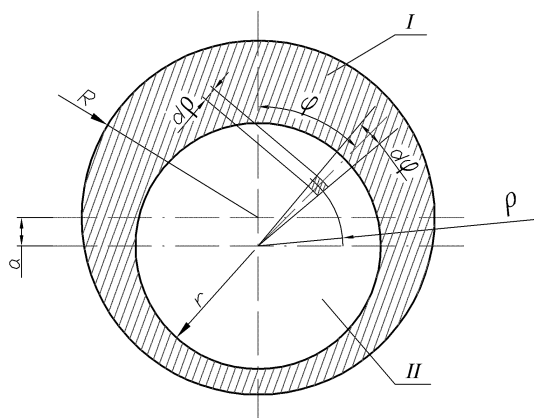
$$\begin{aligned} dM &= X \cdot \sigma_i \cdot dF, \\ dF &= \rho \cdot d\rho \cdot d\varphi, \\ X &= \rho \cdot \cos\varphi. \end{aligned} \quad (8)$$

Tym sposobem

$$dM = \sigma_i \cdot \rho^2 \cdot \cos\varphi \cdot d\rho \cdot d\varphi. \quad (9)$$

Moment zginający naprężeń w przekroju II części:

$$\begin{aligned} M &= 2 \int_0^{\pi r} \int_0^{\pi r} \sigma_i \cdot \rho^2 \cdot \cos\varphi \cdot d\rho \cdot d\varphi, \\ M &= 2 \int_0^{\pi r} \int_0^{\pi r} (\sigma_0 - K\rho_1^2) \cdot \rho^2 \cdot \cos\varphi \cdot d\rho \cdot d\varphi. \end{aligned} \quad (10)$$



Rys. 4. Rysunek do obliczeń momentów niezrównoważonych sił

Współczynnik  $K$  określa się wychodząc z warunków początkowych:

$$\int_0^R \int_0^{2\pi} (\sigma_0 - K\rho_1^2) \cdot \rho^2 \cdot d\rho \cdot d\varphi = 0, \quad (11)$$

$$\int_0^{2\pi} \left( \frac{\sigma_0 \cdot R^2}{2} - \frac{K \cdot R^4}{4} \right) d\varphi = 0.$$

Otrzymano:

$$K = \frac{2\sigma_0}{R^2}, \quad (12)$$

gdzie:  $R$  - promień zewnętrzny półfabrykatu.

Wyrażając  $\rho_1$  w zależności (12) przez zmienną całkowania  $\rho$

$$\begin{aligned} \rho_1^2 &= \rho^2 \sin^2 \varphi + (\rho \cdot \cos \varphi - a)^2, \\ \rho_1^2 &= \rho^2 \cdot \sin^2 \varphi + \rho^2 \cdot \cos^2 \varphi - 2a \cdot \rho \cdot \cos \varphi + a^2, \end{aligned} \quad (13)$$

ostatecznie uzyskano:

$$\rho_1^2 = \rho^2 - 2a \cdot \rho \cdot \cos \varphi + a^2. \quad (14)$$

Podstawiając wyrażenie (12) do wzoru na moment zginający (10), otrzymano:

$$M = 2 \int_0^{\pi} \left[ (\sigma_0 - Ka^2) \cdot \frac{r^3}{3} - \frac{r^5}{5} \right] \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi + 2 \int_0^{\pi} \frac{2a \cdot K \cdot r^4}{4} \cdot \cos^2 \varphi \cdot d\varphi. \quad (15)$$

Pierwsza całka w wyrażeniu (11, 15) jest równa zero. Ostatecznie po przekształceniach uzyskano:

$$M = \frac{\sigma_0 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot a}{R^2}. \quad (16)$$

Przewidywane odkształcenie wału po zdjęciu nierównomiernego naddatku

$$y = \frac{M \cdot L^2}{8E \cdot I_x} = \frac{\sigma_0 \cdot \pi \cdot r^4 \cdot a \cdot L^2}{8R^2 \cdot E \cdot I_x}.$$

gdzie  $I_x = \pi \cdot r^4 / 4$

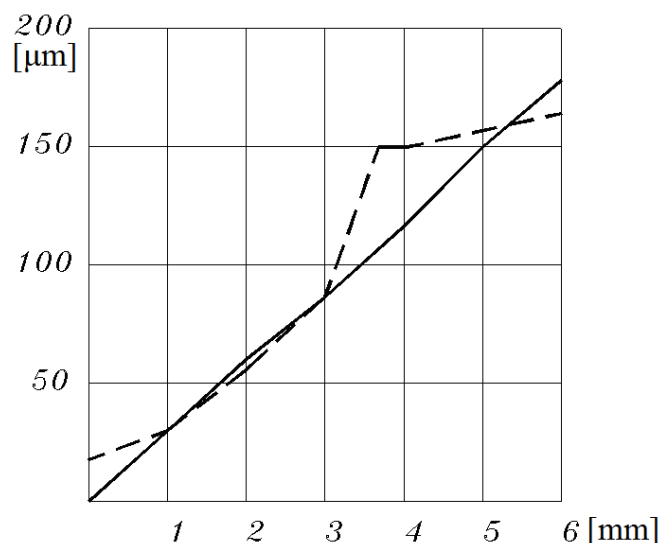
ostateczne wyrażenie może być zapisane w postaci:

$$y = \frac{\sigma_0 \cdot L^2 \cdot a}{2R^2 \cdot E}. \quad (17)$$

Z zależności (17) wynika, że wielkość deformacji zależy głównie od mimośrodu ( $a$ ), długości części ( $L$ ) oraz promienia półfabrykatu ( $R$ ), a nie zależy od promienia części [5, 6].

Na rys. 5 przedstawiono zależności zmian eksperymentalnych i obliczeniowych wielkości odkształceń przy różnych przesunięciach nakiełków.

Obliczone wielkości wypaczeń określano wg wzoru (17), przy czym wielkość ( $\sigma_0$ ) określano wg wyników wcześniej przeprowadzonych eksperymentów. Z przedstawionych na rys. 6. zależności wynika, że obliczone wartości odkształceń odpowiadają eksperymentalnym. Błąd obliczeń w stosunku do wartości eksperymentalnych wynosi 9%.



Rys. 6. Zależności wielkości wypaczeń od przesunięcia nakiełków

W czasie usuwania nierównomiernego naddatku w przekroju odkształcenia sprężyste półfabrykatu pochodzące od działania promieniowej siły skrawania prowadzą z reguły do ugięcia osi obrabianej części, przy czym strona z większym naddatkiem staje się wypukłą.

Ponieważ na powierzchni półfabrykatu skupiają się maksymalne naprężenia szczątkowe ściskające, to przy parabolicznym ich rozkładzie w przekroju poprzecznym w wyniku usunięcia nierównomiernego naddatku odkształcenie szczątkowe prowadzą do tego, że strona po której usunięto większy naddatek staje się wklęsłą. W związku z tym pojawia się możliwość wykorzystania naprężeń szczątkowych w charakterze ugięcia osi części spowodowanych odkształceniami sprężystymi. W czasie toczenia wałów możliwe są następujące przypadki wyjściowych niedokładności półfabrykatu:

1. Przesunięcie nakiełków lub niesymetryczne położenie naddatku. W tym przypadku po zdjęciu naddatku (naddatek celowo jest większy od przesunięcia nakiełków lub niewspółśrodkowości ich położenia):



$$N \geq \Delta_w,$$

gdzie:  $N$  - naddatek,  $\Delta_w$  - przesunięcie nakiętków lub niewspółśrodkowość.

Szczałkowe ugięcia osi  $\Delta_T$  po operacji toczenia określa się:

$$\Delta_T = \frac{C_y \cdot f^y \cdot a_p^x \cdot \cos \kappa_r}{v_c^n} \left( \frac{1}{J_k} + \frac{1}{J_w} + \frac{1}{J_{\text{sup}}} + \frac{16L^3}{3\pi E d^4} \right) - \frac{2\sigma_0 \cdot \Delta_w \cdot L^2}{E \cdot R^2}, \quad (18)$$

gdzie:  $B = \frac{1}{J_k} + \frac{1}{J_w} + \frac{1}{J_{\text{sup}}}$  - sumaryczna sztywność  $UT$ , po przekształceniach otrzymano:

$$\Delta_T = \Delta_w \left[ \frac{C_y \cdot f^y \cdot \cos \kappa_r}{\Delta_w^{1-x} \cdot v_c^n} \left( B + \frac{16L^3}{3E\pi d^4} \right) - \frac{2\sigma_0 \cdot L^2}{E \cdot R^2} \right], \quad (19)$$

gdzie:  $\kappa_r$  - główny kąt przystawienia ostrza.

W obróbce wieloprześciowej niedokładność szczątkowa ugięcia osi po ostatnim przejściu wynosi:

$$\Delta_T^i = \Delta_w \left[ \frac{C_y \cdot f^y \cdot \cos \kappa_r}{\Delta_w^{1-x} \cdot v_c^n} \left( B + \frac{16L^3}{3E\pi d^4} \right) - \frac{2\sigma_0 \cdot L^2}{E \cdot R^2} \right]^i, \quad (20)$$

2. Wyjściowe ugięcie osi półfabrykatu (przy czym wielkość ugięcia  $\Delta_w$  również jest mniejsza od naddatku na obróbkę). W tym przypadku niedokładność szczątkowa (szczątkowe ugięcie osi) wynosi:

$$\Delta_T = \Delta_w - \Delta_{wew.n} + \Delta_{od.s}, \quad (21)$$

gdzie:  $\Delta_{wew.n}$  - ugięcie osi spowodowane rozkładem naprężeń szczątkowych,  $\Delta_{od.s}$  - ugięcie osi uwarunkowane nierównomiernymi sprężystymi odkształceniami półfabrykatu w czasie toczenia. Po podstawieniu wartości  $\Delta_{wew.n}$  i  $\Delta_{od.s}$  otrzymano:

$$\Delta_T = \Delta_w \left[ 1 + \frac{C_y \cdot f^y \cdot \cos \kappa_r}{\Delta_w^{1-x} \cdot v_c^n} \left( B + \frac{16L^3}{3E\pi d^4} \right) - \frac{2\sigma_0 \cdot L^2}{E \cdot R^2} \right], \quad (22)$$

i w ogólnym przypadku dla  $i$  przejść:

$$\Delta_T^i = \Delta_w \left[ \frac{C_y \cdot f^y \cdot \cos \kappa_r}{\Delta_w^{1-x} \cdot v_c^n} \left( B + \frac{16L^3}{3E\pi d^4} \right) - \frac{2\sigma_0 \cdot L^2}{E \cdot R^2} \right]^i, \quad (23)$$

#### 4. PODSUMOWANIE

W czasie zdejmowania nierównomiernego w przekroju naddatku sprężyste odkształcenia półfabrykatu, pochodzące od działania składowej promieniowej siły skrawania, doprowadzają z reguły do ugięcia osi części obrabianej, przy czym strona z największym naddatkiem staje się wypukła.

Ponieważ na powierzchni półfabrykatu skupione są maksymalne naprężenia szczątkowe ściskające, to przy parabolicznym ich rozkładzie w przekroju, w rezultacie zdjęcia nierównomiernego naddatku, odkształcenia szczątkowe powodują, że strona, po której zdjęto większy naddatek, staje się wklęsła. W związku z tym pojawia się możliwość wykorzystania odkształceń szczątkowych w charakterze kompensatora ugięcia osi części wywołanego odkształceniami sprężystymi. Po obróbce tokarskiej ze zróżnicowaniem naddatku wielkość odkształceń sprężysto-plastycznych i szczątkowych nie jest ekwiwalentna ogólnemu momentowi niezrównoważonych sił wewnętrznych, powstających przy zdejmowaniu nierównomiernego naddatku, ponieważ materiał posiada wytrzymałość relaksacyjną. Ogólny niezrównoważony moment wywołuje odkształcenia sprężyste, zmniejszające pułap wytrzymałości relaksacyjnej.

## LITERATURA

1. Абрамов В. В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. – М.: Машгиз, 1963. – 355 с.
2. Кувалин Ю. И., Бурцев В.М. Определение остаточных прогибов, вызванных неравномерностью припуска при обработке нежестких валов // Известия Вузов. Машиностроение, 1988, № 5. – С. 111 – 115
3. Старков В. К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. – М.: Машиностроение, 1989. – 294 с.
4. Кобрин М. М., Дехтярь Л. И. Определение внутренних напряжений в цилиндрических деталях. – М.: Машиностроение, 1965. – 165 с.
5. Halas W., taranenko v., świć a. modelling the accuracy of axialsymetric 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
6. Taranenko V., Świć A., Halas W. Modelling of axis-symmetric shafts turning processing. Автоматизация: Проблемы, Идеи, Решения: Материалы междунар. Научн.-техн. Конф., г. Севастополь, 12-17 сентября 2006 г. - Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. – С. 15 – 16
7. W. Halas, V. Taranenko, A. Swic, H.Glinko 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

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ 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, математическая модель операции точения, учитывающая механизм появления остаточных напряжений при точении, и ее влияние на точность и эксплуатационные характеристики, изготавливаемого вала, как готового изделия.