

Antoni ŚWIĆ¹
Dariusz WOŁOS¹

STEROWANIE DOKŁADNOŚCIĄ OBRÓBKİ WAŁKÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

Określono najodpowiedniejszy schemat ustalenia i zamocowania wałków o małej sztywności oraz czynniki umożliwiające taki wybór, a w trakcie mocowania oprócz zamykania siłowego jest realizowane również zamykanie kinematyczne. Opracowano sposób obróbki mechanicznej wałków o małej sztywności, umożliwiający sterowanie stanem sprężystości – odkształcalnym wałków w układzie technologicznym oraz osiągnięcie wymaganej dokładności w czasie toczenia. Zaprojektowano urządzenie, realizujące opracowany sposób obróbki mechanicznej wałków o małej sztywności, umożliwiające zwiększenie sztywności wałka w trakcie obróbki w wyniku przyłożenia do części osiowej siły rozciągającej. Urządzenie stabilizuje odkształcenia sprężyste części w stanach ustalonych i przejściowych oraz podwyższa dokładność obróbki wałków o małej sztywności. Określono racjonalne koszty własne przygotowania baz technologicznych, na etapie technologicznego przygotowania produkcji, co daje możliwość wyboru odpowiedniej technologii obróbki wałków o małej sztywności, konstruowania zorientowanego technologicznie oraz zmniejszenia kosztów obróbki wałków.

1. WPROWADZENIE

Okolo połowy wszystkich części maszyn to części obrotowe: wały, tarcze, tuleje, cylindry itp. Wśród wszystkich części stosowanych w przemyśle do 12% stanowią wałki o małej sztywności. Znajdują one zastosowanie w przemyśle lotniczym (wałki sprężynujące, elastyczne i skrętne, resory, śruby), przemyśle narzędziowym (różnego rodzaju przyrządy, mechanizmy, narzędzia precyzyjne i specjalne, wiertła, rozwiertaki, gwintowniki, wytaczadła), przemyśle maszynowym (wałki, wirniki turbin i pomp, śruby pociągowe), w maszynach rolniczych (półosie traktorów, kombajnów), przemyśle motoryzacyjnym i innych [1],[7],[9],[13].

Specyfika obróbki wałków o małej sztywności powoduje, że utrudnione jest uzyskanie określonych parametrów dokładności kształtu, wymiarów i jakości powierzchni. Mała sztywność własna oraz względnie niska sztywność wałka w porównaniu ze sztywnymi zespołami obrabiarki powodują powstawanie w określonych warunkach drgań. W trakcie obróbki występuje wiele czynników zakłócających i destabilizujących ten proces (odkształcenia własne części, narzędzie, przyrząd, wióry, pył itp.), co wpływa na

¹ Politechnika Lubelska, Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych,
E-mail: d.wolos@pollub.pl

zmniejszenie dokładności obróbki toczeniem wałków o małej sztywności. Tradycyjne metody osiągnięcia dokładności obróbki wałków o małej sztywności, wykorzystujące obróbkę wieloprzejsiową, obniżone parametry obróbki, podtrzymki oraz dodatkowe zabiegi i ręczne docieranie, prowadzą do istotnego obniżenia wydajności, a w wielu przypadkach nie jest możliwe uzyskanie zakładanego wyniku, to znaczy, wymaganej dokładności; nie odpowiadają również współczesnym wymagom automatyzacji, są nieekonomiczne i mało wydajne.

Wałek o małej sztywności to wałek, w przypadku którego, stosunek długości do średnicy jest nie mniejszy niż 10. Dokładność obróbki wałków o małej sztywności zależy od wielu czynników[8],[10],[11],[12]. Do czynników obniżających dokładność obróbki wałków o małej sztywności, w stanie sprężystości – odkształcalnym, można zaliczyć nieodpowiednie warunki mocowania części, przemieszczenia osi centrowania części, niedokładność bazowania części, kształt elementów zaciskowych, odkształcenia sprężyste i plastyczne. Przy tym niezawodne mocowanie części podczas obróbki wałków o małej sztywności powinno eliminować wzajemne przemieszczenie powierzchni bazowych części i uchwytów oraz uniemożliwiać wyrwanie półfabrykatu ze szczęk uchwytów.

Zwiększenie dokładności obróbki mechanicznej wałków o małej sztywności można uzyskać poprzez sterowanie dokładnością ich kształtowania w stanie sprężystości – odkształcalnym, w wyniku przyłożenia osiowej siły rozciągającej.

2. METODY PODWYŻSZENIA DOKŁADNOŚCI OBRÓBKİ WAŁKÓW SPRĘŻYSTOŚCI – ODKSZTAŁCALNYCH NA ETAPIE PRZYGOTOWANIA PRODUKCJI

Przy określeniu niezbędnej siły zamocowania w uchwytach wrzeciona i konika przy obróbce z rozciąganiem uwzględnia się rodzaj półfabrykatu, tolerancje wymiarów półfabrykatu (części), przyjęty proces technologiczny obróbki i siły skrawania, wymagania dokładności, specyfikę konstrukcji obrabiarki. Siły mocowania półfabrykatu w uchwycie muszą zagwarantować wystarczającą sztywność kontaktu powierzchni stykowych, uniemożliwić ich przemieszczenie podczas obróbki, wyeliminować wzbudzenie drgań, a także zapewnić odpowiednie warunki bhp produkcji, przeciwdziałając wyrwaniu półfabrykatu z uchwytu.

Obciążenie części siłą rozciągającą jest ekwiwalentne dodatkowej podporze, zwiększającej statyczną sztywność części. W tym celu bazowanie i zamocowanie części w koniku jest realizowane w uchwytach krzywkowych lub sprężynujących tulejach mocujących.

Dla mocowania wałka we wrzecienniku i koniku, przy obróbce z rozciąganiem, uwzględnia się rodzaj półfabrykatu, graniczne i dopuszczalne odchyłki jego wymiarów, materiał, przyjęty proces technologiczny obróbki i działające przy tym siły skrawania, wymaganą dokładność obróbki, specyfikę konstrukcji obrabiarki. Siły zamocowania części w uchwycie powinny gwarantować wystarczającą sztywność styku powierzchni, uniemożliwiać ich przemieszczenie w procesie obróbki oraz powstanie drgań. Poprzeczne siły zamocowania wyznacza się z uwzględnieniem współczynnika zapasu $K_z = 1,5 - 8$

[2],[4],[9]. Współczynnik ten wybiera się w zależności od konkretnych warunków wykonania procesu technologicznego. Uwzględnia on między innymi zmienność siły skrawania, niejednorodność materiału części, stopień ostrza oraz zmianę położenia reakcji podpór, w wyniku odchyień w granicach tolerancji rzeczywistych baz technologicznych od geometrycznie prawidłowego kształtu.

Przy zamocowaniu części w uchwycie trójszczekowym i występowaniu osiowej siły rozciągającej niezbędna jest dodatkowa siła tarcia, przeciwdziałająca osiowemu przesunięciu części. Siłę zamocowania określa się według zależności:

$$T = \frac{2K_z M_s}{3fd} + \frac{K_z F_{x1}}{3f} \quad (1)$$

gdzie: M_s – moment sił skrawania, f – współczynnik tarcia, F_{x1} – siła rozciągająca, d – średnica części.

Przy zamocowaniu w tulei sprężynującej o dużej powierzchni mocowania, sumaryczna siła zamocowania, dociskająca zaciski mechanizmu do części, z uwzględnieniem współczynnika zapasu K_z , jest równa:

$$T_\Sigma = K_z \frac{R}{\mu} = \left(\frac{K_z}{\mu} \right) \sqrt{\left(\frac{2M_s}{d} \right)^2 + F_{x1}^2} \quad (2)$$

gdzie: μ – współczynnik przyczepności pomiędzy szczękami tulei sprężynującej, R – siła przyczepności.

Współczynnik μ zależy od rodzaju nacięć na szczękach, materiału części i schematu działania sił. Zalecenia odnośnie wyboru współczynnika μ , w zależności od rodzaju naruszenia więzów ciernych (odcisk sprężysty, odcisk plastyczny, mikroskrawanie) podano w pracach [3],[9]. Zwiększenie sztywności układu uchwyt – część i sił zacisku sprzyja zwiększeniu dokładności i wydajności, ale z kolei zwiększenie sił zacisku może prowadzić do znaczących odkształceń stykowych.

Wartość odkształcenia stykowego h_k w połączeniu elementu zaciskającego z częścią zależy od materiału i kształtu powierzchni współpracujących części, kątów wciśnięcia wzdłużnego ν i poprzecznego γ_b , siły normalnej Q i powierzchni styku S_k (lub naprężeń normalnych σ). W zależności od tych czynników mogą występować różne formy styku (tabela 1): punktowy, liniowy, powierzchniowy – pełny lub powierzchniowy – niepełny, krawędziowy, dwuliniowy, dwustronny powierzchniowy – niepełny.

W celu określenia podstawowych charakterystyk zamocowania: siły, sztywności i dokładności powinno być znane odkształcenie w miejscu styku. Określenie odkształceń stykowych metodami analitycznymi w każdym konkretnym przypadku jest związane z dużą pracochłonnością obliczeń i w niektórych przypadkach może być uzyskane na bazie danych eksperymentalnych. Przy różnorodnych parach tarcia metodą najmniejszych kwadratów otrzymano zależność do obliczania odkształcenia stykowego (μm) w miejscu styku elementu zaciskowego z półfabrykatem [5],[10].

$$h_k = A_m \sigma^t + Q [A_d \Delta d + A_v v + A_\gamma (90^\circ - \gamma_b)] \quad (3)$$

gdzie: A_m , A_d , A_v , A_γ – współczynniki zależne głównie od: materiału i chropowatości współdziałających powierzchni, odchyłek wymiarów części, charakteru wzdłużnego i poprzecznego wcisku elementów mocujących w półfabrykat; $\sigma = Q/S_k$ – naprężenie normalne przy pełnym styku (przy zamocowaniu półfabrykatu okrągłego $S_k = \pi d \gamma_0 b' / 180^\circ$, b' – długość szczęki elementu zaciskającego, γ_0 – połowa kąta opasania) [6],[13].

Tabela 1. Formy styku elementu zaciskowego z mocowaną częścią
Table 1. Types of contact between the clamping element and fixed part

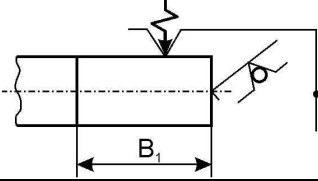
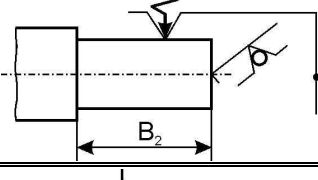
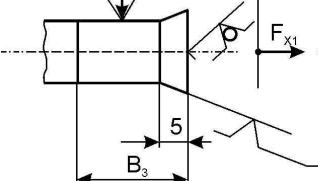
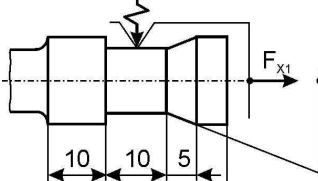
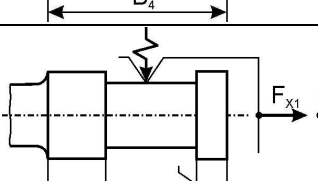
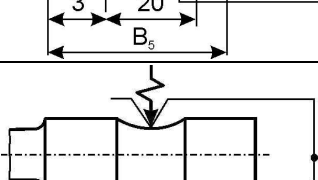
Odchyłka wymiaru półfabrykatu	Widoki styku elementu zaciskowego z mocowaną częścią w przekrojach		
	Przekrój poprzeczny	Przekrój wzdłużny	
		$v_0 = 0$	$v_0 \neq 0$
$\Delta d < 0$ ($r < r_0$) $y_0 < 0$			
$\Delta d = 0$ ($r = r_0$) $y_0 = 0$			
$\Delta d > 0$ ($r > r_0$) $y_0 > 0$			

Analiza wartości wielkości obliczeniowych odkształceń stykowych pokazała, że w wielu przypadkach jest niezbędna dodatkowa obróbka odcinka powierzchni części, znajdującego się w strefie zacisku lub odcięcie tego odcinka. Odcinki te można odnieść, jak wiadomo z teorii bazowania, do zastępczych baz technologicznych, które są tworzone specjalnie ze względów technologicznych i po obróbce przedmiotu mogą być usunięte.

Analiza procesów technologicznych obróbki części o małej sztywności wykazała, że w przemyśle obrabiarkowym przy obróbce śrub pociągowych są stosowane zastępcze bazy technologiczne w celu powtórnego wykonania nakiełków, przy czym bazy te są odcinane.

Tabela 2. Specyfika bazowania i zamocowania wałków o małej sztywności przy obróbce konwencjonalnej oraz przy przyłożeniu siły F_{x1}

Table 2. Patterns of alignment and fixing of low rigidity shafts in standard machining and under the applied force F_{x1}

Lp.	Schematy bazowania końca części przy obciążeniu siłą rozciągającą	Wskaźniki uwzględniane przy wyborze schematu bazowania						Uwagi
		Odkształcenia stykowe	Szerokość przetoczenia	Czas maszynowy	Czas jednostkowy	Koszt przygotowania bazy	Koszt odpadów	
1		h_{k_1}	B_1	—	—	—	C_1''	$d=2\div 4\text{mm}$ $B=20\text{mm}$ $d>4\text{mm}$ $B_1=30\text{mm}$
2		h_{k_2}	B_2	t_{m_2}	t_{j_2}	C_2'	C_2''	$d=2\div 4\text{mm}$ $B_2=2\text{mm}$ $d>4\text{mm}$ $B_2=30\text{mm}$
3		h_{k_3}	B_3	t_{m_3}	t_{j_3}	C_3'	C_3''	$d=2\div 4\text{mm}$ $B_3=20\text{mm}$ $d>4\text{mm}$ $B_3=30\text{mm}$
4		h_{k_4}	B_4	t_{m_4}	t_{j_4}	C_4'	C_4''	$B_4=30\text{mm}$
5		h_{k_5}	B_5	t_{m_5}	t_{j_5}	C_5'	C_5''	$d=18\text{mm};$ $B_5=30\text{mm}$
6		h_{k_6}	B_6	t_{m_6}	t_{j_6}	C_6'	C_6''	$d<10\text{mm}$ $a=5\text{mm}$ $10<d<18$ $a=10\text{mm}$ $d\geq 18\text{mm}$ $a=12\text{mm}$ $B_6=30\text{mm}$

W przemyśle lotniczym przy obróbce wielonożowej również stosowane są podobne bazy, a ich występowanie jest uwarunkowane specyfiką bazowania wałków o małej sztywności i wyposażenia wielonarzędziowego.

Specyfika bazowania i zamocowania wałków o małej sztywności w procesie zwykłej obróbki wieloprzejęciowej i obróbki z przyłożeniem siły rozciągającej jest przedstawiona w tabeli 2. W wierszu 1 pokazano schemat bazowania bez obróbki wstępnej, a w wierszu 2 z obróbką końca półfabrykatu, przy zamocowaniu i obciążeniu go siłą rozciągającą mechanizmem mocującym z zamykaniem siłowym (w wyniku działania sił zewnętrznych w całym okresie pracy). Wiersze 3, 4, 5, 6 – przy zastosowaniu zastępczych baz technologicznych i mechanizmów zaciskowych z zamykaniem geometrycznym i siłowym przy obróbce, zarówno z rozciąganiem osiowym, jak i przemieszczeniem względem osi kłów (przy momencie sterującym na czołach części). Takie wykonanie baz technologicznych zwiększa niezawodność zacisku i wyklucza przemieszczenie powierzchni części względem mechanizmu zaciskającego w procesie obróbki. Schematy bazowania i zamocowania końca przedmiotu przy obciążeniu siłą rozciągającą charakteryzują się dużą liczbą wskaźników, przyjmujących różne wartości, które należy uwzględnić przy wyborze schematu bazowania.

Wymiary geometryczne obrabianych części o małej sztywności, parametry procesu skrawania i wartości składowych sił skrawania zestawiono w tabeli 3, a czasy przygotowania baz technologicznych w tabeli 4.

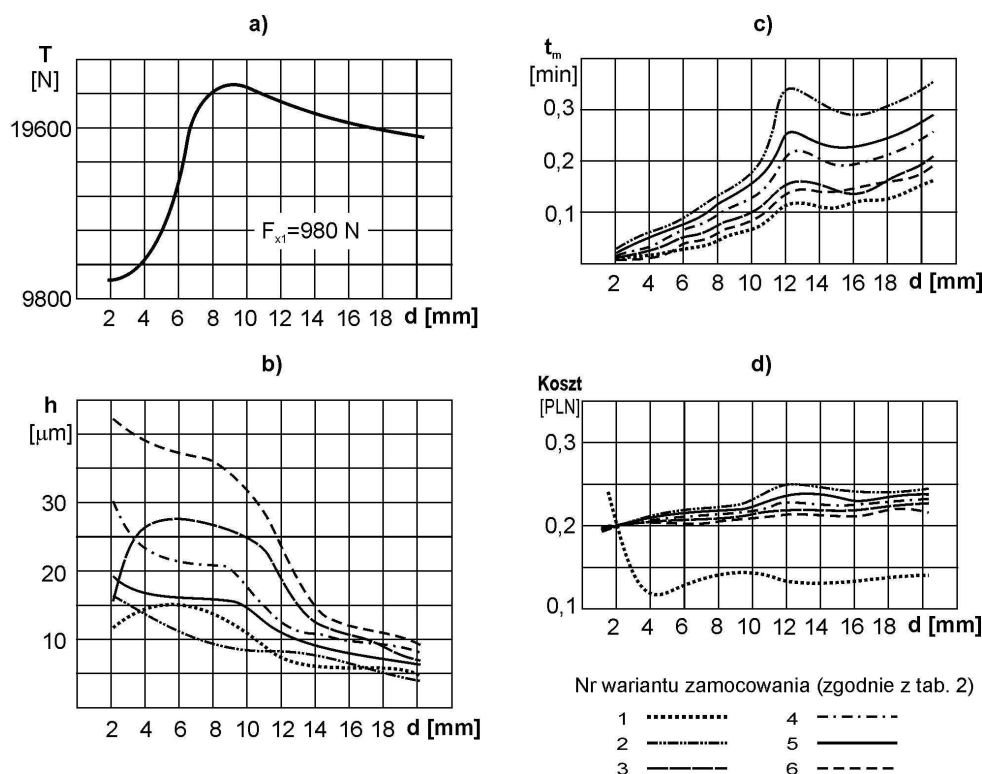
Tabela 3. Wybrane parametry obróbki
Table 3. Selected parameters of machining

	d [mm]									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
L [mm]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
a_p [mm]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
f [mm/obr]	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,12	0,12
v [mm/min]	105,6	80,3	70,4	62,6	58	53	45,6	39,2	36	31
F_c [N]	16,0	36,7	65,5	95,3	131,1	174,6	276,6	409	467	534
F_p [N]	12,4	27,9	45,4	66,8	91,4	112,5	178	245	289	323,4
F_f [N]	11,7	28,1	49	70,6	98	127,4	199	274,4	319	358,7

Tabela 4. Czas przygotowania baz technologicznych
Table 4. Time of preparing technological alignment centers

Nr wariantu	d [mm]									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
1	0,227	0,80	0,91	0,96	0,99	1,01	1,00	1,01	1,02	1,04
2	1,4265	1,49	1,51	1,56	1,57	1,88	1,84	1,79	1,85	1,88
3	1,4363	1,47	1,48	1,52	1,53	1,69	1,68	1,67	1,69	1,71
4	1,4418	1,48	1,5	1,64	1,55	1,76	1,74	1,69	1,76	1,78
5	1,4286	1,43	1,46	1,48	1,50	1,79	1,77	1,72	1,79	1,81
6	1,4312	1,46	1,47	1,49	1,50	1,68	1,67	1,68	1,69	1,71

Analityczną zależność zmiany siły zacisku, przy różnych parametrach geometrycznych części i niezbędnych do obliczeń wartości odkształceń stykowych h_{ki} w miejscu zacisku, przedstawiono zgodnie z zależnością (2) na rys. 1a. Przyjmując, że kontakt elementu zaciskowego z mocowaną częścią w przekroju poprzecznym jest liniowy, a we wzdlużnym – na całej powierzchni, wyznaczono wartości h_{ki} według zależności (3). Charakter zmiany wartości odkształceń stykowych przy różnych schematach bazowania przedstawiono na rys. 1b. Z wykresu wynika, że zakres zmian wartości odkształceń stykowych jest dostatecznie szeroki i zależy od wymiarów i specyfiki konstrukcyjnej elementów zaciskowych, a także zastosowania elementów zaciskowych z zamykaniem siłowym lub geometrycznym i siłowym. Wykres zmiany czasu maszynowego $t_m = L/n f$ przedstawiono na rys. 1c, przy czym dla wariantu I – t_{m1} jest czasem odcięcia końca półfabrykatu. Analiza wartości t_{m1} (na przygotowanie baz) pokazuje, że wartość ta w porównaniu z czasem maszynowym obróbki wieloprześciowej jest nieznaczna (na przykład przy obróbce wałka o małej sztywności $d = 4$ mm, $L = 95$ mm, $t_m = 1,53$ min, a czas t_m na przygotowanie zastępczych baz technologicznych w przypadku wszystkich wariantów wynosi 0,06 min. Wartości czasów przygotowania baz technologicznych ($t = t_m + t_p + t_o + t_{prz} + t_{mu}/N_i$; $t_{ob.} = t_{prz} = 0,03 (t_m + t_p)$; $t_p = t_u + t_w + t_n + t_{prz}$) zestawiono w tabeli 4.



Rys. 1. Zależności wybranych wielkości od średnicy części: a) wykres zmiany obliczeniowej siły zacisku, b) analityczne zależności zmiany odkształceń stykowych przy różnych schematach zamocowania, c) zależności zmiany czasu maszynowego t_{mi} przy różnych schematach zamocowania, d) zależności zmiany pełnego kosztu własnego przygotowania baz technologicznych

Fig. 1. Dependence of selected parameters on part diameter: a) chart showing the calculated variation in clamping force, b) analytic dependences of contact deformations on different patterns of fixing, c) variation in machine time t_{mi} depending on fixing patterns, d) variation in full prime cost depending on technological alignment centre preparation

Zmienność pełnych kosztów własnych przygotowania zastępczych baz technologicznych, przy obróbce wałków o małej sztywności z rozciąganiem, pokazano na rys. 1d. Najniższe nakłady są w przypadku wariantu 1, gdzie jest niezbędne tylko odcięcie odcinka części znajdującego się w strefie zacisku. Koszty przygotowania baz technologicznych w pozostałych wariantach różnią się, ale nie przewyższają 5 – 10% całego kosztu jednoprzeciściowej obróbki z przyłożeniem sił rozciągających.

Z analizy otrzymanych wartości wskaźników, uwzględnianych przy wyborze schematów bazowania i zamocowania końca części, wynika, że:

1. Wartość h_{ki} zależy od siły zacisku oraz charakteru styku elementów zaciskowych z powierzchnią części.
2. Szerokość przetoczenia B_i wynika z wykonania konstrukcyjnych elementów zaciskowych i może zmieniać się w szerokim zakresie. W ogólnym przypadku $B_1 \neq B_2 \neq B_3 \neq B_4 \neq B_5 \neq B_6$.
3. Czas maszynowy t_{mi} , na przygotowanie zastępczej bazy technologicznej, jest także określany w zależności od konstrukcyjnego wykonania elementów zaciskowych oraz zastosowanego narzędzia; $t_{m1} \neq t_{m2} \neq t_{m3} \neq t_{m4} \neq t_{m5} \neq t_{m6}$, t_{m1} – odcięcie końca części, wielkości t_{m2} i t_{m3} wchodzi w czas maszynowy obróbki części.
4. Czas przygotowawczy – zakończeniowy zależy od dużej liczby czynników i może mieć różne wartości: t_{pz2} i t_{pz3} wchodzi w t_{pz} wykonania części, $t_{pz3} \neq t_{pz4} \neq t_{pz5} \neq t_{pz6}$.
5. Koszty własne przygotowania bazy zależą od dużej liczby czynników i mogą się zmieniać: C'_2 i C'_3 – wchodzi do kosztów własnych wykonania przedmiotu $C'_3 \neq C'_4 \neq C'_5 \neq C'_6$.
6. Koszt odpadów utylizowanych zależy od rodzaju materiału obrabianego oraz specyfiki konstrukcyjnej elementów zaciskowych, przy czym wielkość C_i'' także zmienia się w zakresie od C_1'' do C_6'' .

Przedstawiony zbiór wskaźników, uwzględniany przy wyborze schematów bazowania i zamocowania, nie jest pełny i może się zmieniać w zależności od posiadanych i stosowanych elementów zaciskowych, asortymentu i wielkości partii obrabianych części oraz parku obrabiarkowego.

Uzyskane wyniki odnośnie wyboru schematów zamocowania zostały wykorzystane przy obróbce części w opracowanym urządzeniu.

3. URZĄDZENIE DO OBRÓBK MECHANICZNEJ WAŁKÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

Na podstawie przeprowadzonych badań teoretycznych i doświadczalnych został opracowany sposób obróbki mechanicznej, który umożliwia osiągnięcie wymaganej dokładności w czasie toczenia i jednocześnie sterowanie stanem sprężystości – odkształcalnym wałków.

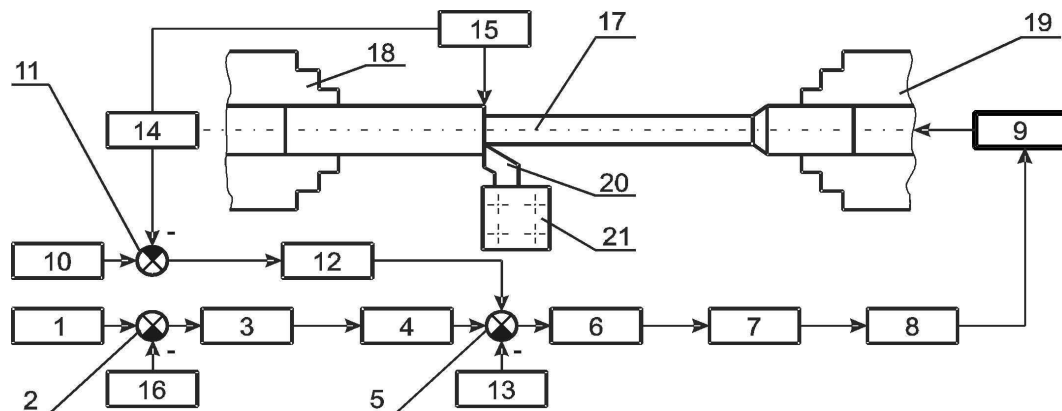
W czasie obróbki wałków o małej sztywności działanie zakłóceń losowych powoduje powstanie drgań, a przy pracy w strefie rezonansowej zwiększa się chropowatość

powierzchni części, zmniejsza się trwałość ostrza narzędzia, zmienia się geometria warstwy skrawanej, co prowadzi do zwiększenia odkształceń sprężystych układu technologicznego (UT – tzw. OUPN – Obrabiarka-Uchwyt-Przedmiot-Narzędzie) oraz obniżenia dokładności obróbki.

Przy obróbce mechanicznej wałków o małej sztywności, w oparciu o pomiary odkształceń sprężystych części, są zmieniane wartości napięcia podawanego na wejście silnika prądu stałego oraz odpowiednie przemieszczenia kątowe i liniowe na jego wyjściu, które przez mechanizm naciągu są przekształcane w osiową siłę rozciągającą, przykładaną do wałka o małej sztywności.

Przed rozpoczęciem obróbki należy wytworzyć określoną początkową siłę rozciągającą. W tym celu należy usunąć luzy mechanizmu napinania tak, aby rzeczywista i określona wartość siły rozciągania były równe, a po rozpoczęciu procesu obróbki – były równe rzeczywiste i wymagane wartości odkształceń sprężystych części.

Schemat blokowy urządzenia, realizującego sposób obróbki mechanicznej wałków o małej sztywności, przedstawiono na rys. 2 [13]. Urządzenie zawiera połączone szeregowo: nastawnik prędkości 1, pierwszy człon porównujący 2, regulator prędkości 3, nastawnik początkowej siły rozciągającej 4, człon porównujący 5, regulator siły rozciągania 6, przetwornik sterowany 7, silnik prądu stałego 8, mechanizm naciągu 9, a także nastawnik odkształceń sprężystych 10, drugi człon porównujący 11, regulator nieliniowy odkształceń sprężystych 12, czujnik siły rozciągania 13, blok wyodrębnienia wartości bezwzględnej 14, czujnik odkształceń sprężystych 15, czujnik prędkości 16.



Rys. 2. Schemat blokowy urządzenia realizującego obróbkę mechaniczną wałków o małej sztywności: 1-nastawnik prędkości, 2 – pierwszy węzeł porównania, 3 – regulator prędkości, 4- nastawnik początkowego obciążenia rozciągającego, 5 - węzeł porównania, 6 – regulator siły rozciągającej, 7 – przetwornik sterowalny, 8 – urządzenie elektroruchowe, 9 - mechanizm przyłożenia siły rozciągającej, 10 – nastawnik odkształceń sprężystych, 11 – drugi węzeł porównania, 12 – nieliniowy regulator odkształceń sprężystych, 13 – czujnik siły rozciągającej, 14 – blok wyodrębnienia modułu, 15 – czujnik odkształceń sprężystych, 16 – czujnik prędkości, 17 – wałek obrabiany, 18 – uchwyt I końca wałka, 19 – uchwyt II końca wałka, 20 – ostrze, 21 – oprawka nożowa

Fig. 2. Block diagram of the apparatus used in the machining of low rigidity shafts: 1- velocity selector, 2 – first comparison element, 3 – velocity controller, 4- selector of initial tensile load, 5 – comparison element, 6 – tensile force controller, 7 – controllable transducer, 8 – electro-motion device, 9 – tensile force application mechanism, 10 – controller of elastic deformations, 11 – second comparison element, 12 – nonlinear controller of elastic deformations, 13 – tensile force sensor, 14 – block of module determination, 15 – elastic deformations sensor, 16 – velocity sensor, 17 – workpiece, 18 – grip I of shaft end, 19 – grip II of shaft end, 20 – cutting edge, 21 – tool post

Do wejść członu porównującego 5 dodatkowo jest podłączony czujnik 13 siły rozciągającej i wyjście nieliniowego regulatora odkształceń sprężystych 12, którego wejście jest połączone przez drugi człon porównujący 11 z nastawnikiem odkształceń sprężystych 10. Czujnik 1 odkształceń sprężystych 5 przez blok wyodrębnienia wartości bezwzględnej 14 jest podłączony do drugiego wejścia członu porównującego 11, a czujnik prędkości 16 jest połączony z drugim wejściem pierwszego członu porównującego 2. Jeden koniec części obrabianej 17 zamocowany jest w uchwycie 18, a drugi w uchwycie 19, który jest połączony z mechanizmem naciągu 9. Obróbka części realizowana jest narzędziem 20 zamocowanym w imaku 21.

Urządzenie pracuje w warunkach wytworzenia wstępnej siły rozciągającej. W momencie początkowym napięcia na wyjściach czujnika odkształceń sprężystych 15 – U_{15} , czujnika prędkości 16 – U_{16} i czujnika siły rozciągania 13 – U_{13} są równe zero. Napięcie U_{12} , na wyjściu nieliniowego regulatora odkształceń sprężystych 12, również jest równe zero. Na wejście regulatora prędkości 3, przez pierwszy człon porównujący 2, jest podawane napięcie U_1 z nastawnika prędkości 1 – regulator prędkości 3 znajduje się w stanie nasycenia: napięcie wyjściowe (napięcie nasycenia regulatora prędkości 3) przez nastawnik początkowej siły rozciągającej 4, człon porównujący 5, regulator siły rozciągającej 6, przetwornik sterowany 7 i silnik prądu stałego 8 przechodzi do mechanizmu naciągu 9. Następuje gwałtowny wzrost prędkości silnika 8 i mechanizmu naciągu 9. Podczas wzrostu prędkości wzrasta napięcie U_{16} czujnika prędkości 16, a napięcie U_2 na wyjściu pierwszego członu porównującego 2 ulega obniżeniu.

$$U_2 = U_1 - U_{16}, \quad (4)$$

Kiedy wartość prędkości zbliża się do wymaganej (przez nastawnik prędkości 1), napięcie U_2 na wyjściu pierwszego członu porównującego 2 dąży do zera. Regulator prędkości 3 wychodzi ze stanu nasycenia i ustala się wartość prędkości stabilizacji. Ruch jałowy mechanizmu naciągu 9 odbywa się więc z określoną prędkością, co eliminuje niedopuszczalne skoki.

Po określeniu ruchu jałowego mechanizm 9 przechodzi w stan stabilizacji początkowej siły rozciągającej, której wartość jest proporcjonalna do napięcia wyjściowego U_4 nastawnika początkowej siły rozciągania 4. Etap ten przebiega następująco: napięcie na wyjściu czujnika odkształceń sprężystych 15 i napięcie U_{12} na wyjściu nieliniowego regulatora odkształceń sprężystych 12 pozostają równe zero. Po wybraniu ruchu jałowego powstaje napięcie U_{13} na wyjściu czujnika siły rozciągania 13 i napięcie U_5 na wyjściu członu porównującego 5 zaczyna się zmniejszać:

$$U_5 = U_4 + U_{12} - U_{13} \quad (5)$$

Zmniejszeniu ulega napięcie podawane przez przetwornik sterowalny 7 na silnik 8, co powoduje obniżenie prędkości silnika. Po zakończeniu procesu przejściowego prędkość silnika 8 zmniejsza się do zera, a regulator prędkości 3 ponownie przechodzi w stan nasycenia. Napięcie U_4 na wyjściu nastawnika początkowej siły rozciągania 4 pozostaje stałe i określa wartość wstępnej siły rozciągania. Po wytworzeniu początkowej siły

rozciągającej jest włączany posuw obrabiarki i rozpoczyna się proces obróbki wałka. Na tym etapie urządzenie działa w trybie stabilizacji wymaganej wartości odkształceń sprężystych. Napięcie U_{15} z czujnika odkształceń sprężystych 15 przez blok wartości bezwzględnej 14 jest podawane na drugi człon porównujący 11, gdzie porównywane jest z napięciem U_{10} nastawnika odkształceń sprężystych 10. Blok 14 wartości bezwzględnej przekształca napięcie U_{15} czujnika odkształceń sprężystych 15 w napięcie o stałym znaku U_{14} . Jeśli bieżąca wartość odkształceń sprężystych jest mniejsza od wymaganej (wartość odkształceń sprężystych w szczególnym przypadku, może być równa zero), to napięcie na wyjściu drugiego członu porównującego 11:

$$U_{11} = U_{10} - U_{14}, \quad (6)$$

jest większe od zera, a napięcie wyjściowe U_{12} nieliniowego regulatora odkształceń sprężystych 12, w wyniku nieliniowości jego charakterystyki, równe jest zero. Przy tym urządzenie podtrzymuje ustaloną wartość wstępnej siły rozciągającej.

Jeśli wartość odkształceń sprężystych przekroczy wartość zadaną, to we wzorze (6) zmienia się znak napięcia U_{11} na wyjściu drugiego członu porównującego 11 i pojawia się napięcie U_{12} na wyjściu nieliniowego regulatora odkształceń sprężystych 12. Przy tym zgodnie z (5) rośnie napięcie U_5 , powoduje to wzrost napięcia na silniku 8 i zwiększenie siły rozciągającej wałek. W wyniku tego odkształcenia sprężyste części ulegają obniżeniu do założonego poziomu. Wprowadzenie elementu wyodrębnienia wartości bezwzględnej 14 (napięcie o stałym znaku), sprawia, że urządzenie zgodne z opisanym algorytmem zwiększa wartość siły rozciągania, przy wzroście wartości bezwzględnej odkształceń sprężystych niezależnie od ich znaku. Daje to możliwość kompensowania odkształceń sprężystych zarówno w przypadku, kiedy ekwiwalentna siła skrawania powoduje przesunięcie części w kierunku ostrza, jak i wtedy kiedy część jest odciągana (odpychana) od ostrza.

Dokładność obróbki wałków o małej sztywności można zwiększyć w wyniku stabilizacji odkształceń sprężystych poprzez przyłożenie do części siły rozciągającej. Wysoka dokładność stabilizacji odkształceń sprężystych części w stanach ustalonych i przejściowych umożliwia również podwyższenie dokładności obróbki wałków o małej sztywności.

4. OCENA EFEKTYWNOŚCI PROCESU OBRÓBKİ CZĘŚCI

Przy ocenie efektywności procesów technologicznych obróbki części oraz ich poszczególnych operacji najczęściej bierze się pod uwagę koszt własny. Ocena różnych wariantów produkcji była przeprowadzona według kosztów własnych technologicznych (bez uwzględniania kosztów materiałów, które przy porównywanych wariantach są stałe). Jednak w przypadku, kiedy porównywane warianty różnią się ilością zużywanych materiałów, należy analizować pełne koszty własne części [6],[7],[13].

Jako wskaźniki efektywności procesu technologicznego można zastosować nakłady:

$$P_N = E_N K + C_P G, \quad (7)$$

gdzie: E_N – normatywny współczynnik zwrotu nakładów kapitałowych; K – nakłady kapitałowe (początkowe nakłady); C_P – pełne koszty własne części; G – roczna produkcja części. Pełny koszt własny części:

$$C_P = C_1 + C_2, \quad (8)$$

gdzie: C_1, C_2 – części pełnego kosztu własnego zależne od parametrów skrawania i od zużycia materiałów. Tak więc:

$$P_N = E_N K + (C_1 + C_2) G. \quad (9)$$

Można rozpatrywać dwa rodzaje optymalizacji według tego kryterium: wariantową i parametryczną.

Optymalizacja wariantowa zawiera w sobie wybór optymalnego wariantu procesu technologicznego obróbki części, ponieważ wymagana jakość części przy założonej wydajności może być uzyskiwana różnymi metodami obróbki, różniącymi się zastosowanymi urządzeniami, oprzyrządowaniem, narzędziami, półfabrykatami.

W ogólnym przypadku to samo zagadnienie technologiczne można rozwiązać na J sposobów, w przypadku j – go wariantu ($j = 1, \dots, J$) nakłady określić można z zależności:

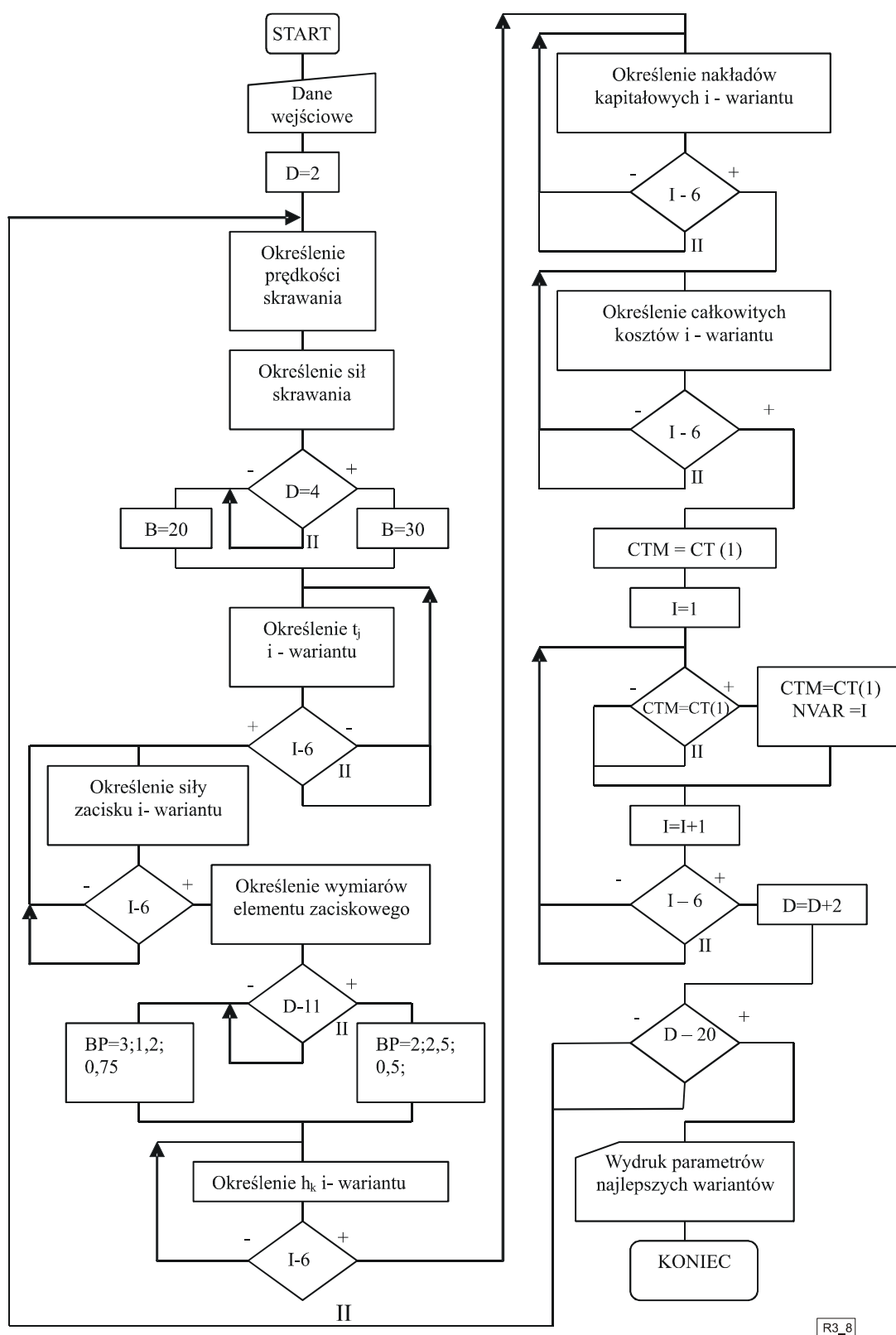
$$P_{Nj} = E_N K + (C_{1j} + C_{2j}) G. \quad (10)$$

Parametry ogólne E_N, G – przy wszystkich wariantach są niezależne od j (E_N wybiera się zgodnie z normatywami branżowymi; G – zgodnie z planem), przy czym bardziej wydajne warianty gwarantują produkcję przy mniejszej liczbie urządzeń. Celem optymalizacji wariantowej jest wybór wariantu o najmniejszym P_N , to jest $\min P_{Nj}$ przy $1 \leq j \leq J$.

Nakłady kapitałowe zależą od stosowanych przy j – tym wariantcie środków technicznych. Część kosztów własnych C_{2j} zależy od stosowanych półfabrykatów, materiałów pomocniczych w każdym wariantcie obróbki wieloprzejściowej lub obróbki w stanie sprężystości – odkształcalnym przy różnych schematach bazowania i nie może być określona jednoznacznie, dlatego powstaje zagadnienie optymalizacji wariantowej. Część technologiczna kosztów własnych C_{1j} zależy głównie od parametrów obróbki (v, a_p, f), naddatków międzyoperacyjnych, tolerancji wymiarów i trwałości narzędzia skrawającego (optymalizacja parametryczna). Optymalizacja parametryczna jest to wybór racjonalnych parametrów technologicznych w przypadku konkretnego sposobu obróbki części. Niech $\vec{Y}_j$ jest wektorem, składowymi którego są wyszczególnione w tabeli 2 wskaźniki, a $\vec{X}_j$ – wektor, składowymi którego są parametry technologiczne w j – tym wariantcie. Należy przy tym uwzględniać ograniczenia, określające zamknięte zbiory, do których należą zarówno wektor parametrów technologicznych, jak i wektor wskaźników bazowania:

$$\vec{Y}_j \in N_{oj}, \quad \vec{X}_j \in M_{oj}, \quad (11)$$

gdzie: N_{oj}, M_{oj} – odpowiednio zamknięty zbiór dopuszczalnych wartości wektora $\vec{Y}_j, \vec{X}_j$.



R3_8

Rys. 3. Schemat blokowy algorytmu określania parametrów i kosztów własnych przy obróbce z rozciąganiem wałka sprężyste – odkształcalnego

Fig. 3. Block diagram for determining parameters and costs in the tensile machining of an elastic-deformable shaft

Zatem przy optymalizacji wariantowej i parametrycznej powinien być spełniony warunek:

$$\min_j PN_j(\overrightarrow{Y_j}; \overrightarrow{Y_j} \in N_{oj}; \overrightarrow{X_j}; \overrightarrow{X_j} \in M_{oj}) \quad (12)$$

W tym przypadku jest rozpatrywany pełny koszt własny C_p wykonania części, a więc wyrażenie matematyczne przy jednym celu optymalizacji parametrycznej i wariantowej można zapisać jako:

$$\min_{1 \leq j \leq J} \left[E_N K_j + G \min_{\overrightarrow{Y_j} \in M_{oj}} C_{2j}(\overrightarrow{Y_j}) + G \min_{\overrightarrow{X_j} \in M_{oj}} C_{1j}(\overrightarrow{X_j}) \right]. \quad (13)$$

$$\min_{1 \leq j \leq J} \left[\min_{\overrightarrow{Y_j} \in N_{oj}} C_{2j}(\overrightarrow{Y_j}) + \min_{\overrightarrow{X_j} \in M_{oj}} C_{1j}(\overrightarrow{X_j}) \right], \quad (14)$$

a w przypadku optymalizacji wariantowej przy wyborze najwłaściwszego schematu bazowania przy obróbce sprężystości – odkształcalnych wałków o małej sztywności:

$$\min_{1 \leq j \leq J} \left[\min_{\overrightarrow{Y_j} \in N_{oj}} C_{2j}(\overrightarrow{Y_j}) \right]. \quad (15)$$

Rozwiązania oraz wszystkie obliczenia pośrednie parametrów i kosztów własnych były realizowane według algorytmu przedstawionego na rys. 3, przy najodpowiedniejszym wariantie bazowania i zamocowania, przy obróbce wałka sprężystości – odkształcalnego, w celu otrzymania określonej konfiguracji.

Część bloków (od 2 do 18) umożliwia wprowadzanie danych wejściowych do programu i obliczanie parametrów technologicznych procesu obróbki, wymiarów elementów zaciskowych i wartości odkształceń stykowych. Druga część bloków (od 19 do 30) realizuje obliczenia i porównanie pełnego kosztu własnego C_{pj} w przypadku j – go wariantu bazowania w porównaniu z wariantem określonym podczas analizy poprzednich $j - 1$ wariantów.

Przy obliczaniu czasu początkowego (pierwszy wariant) taka analiza nie była prowadzona. Wariant drugi porównano z pierwszym; trzeci porównywano z najlepszym z dwóch poprzednich wariantów. Po zakończeniu obliczeń kosztów własnych wszystkich sześciu wariantów określono parametry technologiczne najlepszego wariantu, według kryterium kosztu własnego. W przedstawionym przykładzie wariantem najlepszym jest wariant nr 1 (tabela 2), dla którego koszt własny osiąga wartość najmniejszą.

5. PODSUMOWANIE

Analiza powiązań przyczynowo – skutkowych niezawodności technologicznej oraz parametrów technologicznych, gwarantujących niezawodne zamocowanie wałków sprężystość – odkształcalnych w procesie obróbki tokarskiej, umożliwiła wyodrębnienie najkorzystniejszego zestawu czynników, uwzględnianych przy wyborze schematów ustawienia i zamocowania wałków o małej sztywności. Istotne jest również to, że w trakcie zamocowania oprócz zamykania siłowego realizowane jest też zamykanie kinematyczne.

Wyodrębnione powiązania stanu sprężystości – odkształcalnego części z parametrami technologicznymi procesu oraz wskaźnikami niezawodności technologicznej zostały wdrożone w nowym sposobie obróbki mechanicznej wałków o małej sztywności. Zaprojektowane urządzenie, realizujące opracowany sposób obróbki mechanicznej wałków o małej sztywności, pozwala na zwiększenie sztywności wałka w trakcie obróbki w wyniku przyłożenia siły rozciągającej, co umożliwia stabilizację, na wysokim poziomie, odkształceń sprężystych części w stanach ustalonych i przejściowych oraz podwyższenie dokładności obróbki wałków o małej sztywności. Optymalizacja kosztów własnych przygotowania baz technologicznych na etapie technologicznego przygotowania produkcji daje możliwość wyboru racjonalnej technologii obróbki wałków o małej sztywności, konstruowania zorientowanego technologicznie oraz zmniejszenia kosztów obróbki wałków.

LITERATURA

- [1] ABAKUMOV A.M., VORONIN P.A., DENKEVIC V.A., 1978, *Mathematical model of the process of turning with control of straight feed and spindle rotation speed*, NIImash. – Dep. V VINITI, 2.
- [2] BISU C.F., K'NEVEZ J.Y., DARNIS P., LAHEURTE R., GERARD A., 2009, *New method to characterize a machining system: application in turning*, Int J Mat Form, 2/93, 105.
- [3] CARDI A.A., FIRPI H.A., BEMENT M.T., LIANG S.Y., 2008, *Workpiece dynamic analysis and prediction during chatter of turning process*, Mechanical Systems and Signal Processing, 22, 1481-1494.
- [4] JIANLIANG G., RONGDI H., 2006, *A united model of diametral error in slender bar turning with a follower rest*, Int J Mach Tools Manufac, 46,1002-1012.
- [5] LI C.J., ULISOY A.G., ENDRES W.J., 2003, *The effect of flexible-tool rotation on regenerative instability in machining*, J Manuf Science Engineer, 125, 39-47.
- [6] OUYANG H., WANG M., 2007, *A dynamic model for a rotating beam subjected to axially moving forces*, J Sound Vibr, 308, 674-682.
- [7] ŚWIĆ A., 2009, *Technologia obróbki wałków o małej sztywności*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 244.
- [8] ŚWIĆ A., TARANENKO W., 2012, *Adaptive control of machining accuracy of axial-symmetrical low rigidity parts in elastic-deformable state*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 14/3, 215-221.
- [9] ŚWIĆ A., TARANENKO W., SZABELSKI J., 2011, *Modelowanie układów dynamicznych szlifowania wałków o małej sztywności/Modelling dynamic systems of low-rigid shaft grinding*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 2/50, 13 – 24.
- [10] ŚWIĆ A., WOŁOS D., LITAK G., 2014, *Method of control of machining accuracy of low-rigidity elastic-deformable shafts*, Latin American Journal of Solids and Structures, 11/2, 260-278.
- [11] ŚWIĆ A., ZUBRZYCKI J., TARANENKO W., 2013, *Modelling and systemic analysis of models of dynamic systems of shaft machining*, Applied Mechanics and Materials, 282, 211-220.
- [12] XIONG G.L., YI J.M., ZENG C., GUO H.K., LI L.X., 2003, *Study of gyroscopic effect of the spindle on stability characteristics of the milling system*, J Manuf Process Tech, 138, 379-384.

- [13] WOŁOS D., TARANENKO W., TARANENKO G., ŚWIĆ A., 2009, *Zwiększenie niezawodności technologicznej obróbki toczeniem wałków o małej sztywności*, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, 163.

ACCURACY CONTROL IN THE MACHINING OF LOW RIGIDITY SHAFTS

The study determines the most suitable pattern of alignment and fixing of low-rigidity shafts; it also presents factors that determine such choice. The part is fixed both by force closing and kinematic closing. A new method for machining low rigidity shafts is developed to control the elastic-deformable state of these shafts in a technological system and to produce parts with the required accuracy during turning. To implement this new developed method for low rigidity shafts, an apparatus is designed. The apparatus allows to increase the rigidity of shafts during machining by the application of axial tensile force to the workpiece. The apparatus stabilizes elastic deformations in the workpiece both in a steady state and under transitory conditions; it also increases the machining accuracy of low rigidity shafts. Rational prime costs of preparing technological alignment centers at the stage of production preparation are determined; knowing these costs, it is possible to select a suitable machining technology for low rigidity shafts, to produce a technology-oriented design, and to reduce the costs of machining these shafts.

Keywords: *control, accuracy machining, shaft, rigidity*