

Doc. dr inż. Aleksandr Draczow  
Państwowy Uniwersytet Techniczny w Togliatti, Rosja  
Doc. dr inż. Georgij Taranenko  
Narodowy Uniwersytet Techniczny w Sewastopolu, Ukraina  
Prof. dr hab. inż. Wiktor Taranenko  
Dr hab. inż. Antoni Świć, prof. ndzw.  
Politechnika Lubelska  
Mgr inż. Witold Hałas  
Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Chełmie

## **STEROWANIE OBRÓBKĄ WIBRACYJNĄ WAŁÓW DŁUGOWYMIAROWYCH**

*W artykule analizowane są procesy dynamiczne przebiegające podczas obróbki wibracyjnej półfabrykatów o małej sztywności. Przedstawiono sposób sterowania parametrami technologicznymi umożliwiającą identyfikację procesów relaksacji i uzyskanie odpowiednich parametrów geometrycznych półfabrykatu.*

### **CONTROLLING THE VIBRATORY MACHINING OF LONG SHAFT**

*The article is devoted to the problem of dynamic of the low-rigid work pieces by the affection vibration. The method of control of technological parameters to intensify of the stress relaxation and increasing of the part geometrical stability is substantiated.*

#### **1. WSTĘP**

Zwiększenie efektywności obróbki części o małej sztywności wymaga utrzymania w odpowiednim zakresie ich parametrów geometrycznych. Zaproponowano urządzenie i technologię stabilizujące proces obróbki wibracyjnej wałów o małej sztywności.

Zagwarantowanie odpowiedniej tolerancji wymiarów wałów o małej sztywności o stosunku długości do średnicy powyżej 10 jest niemożliwe bez zmniejszenia naprężeń wewnętrznych - naprężeń technologicznych początkowych i szczytkowych w odpowiednich przekrojach części. Szczególnie istotne jest to w przypadku stali nierdzewnych, dla których oprócz naprężeń szczytkowych spowodowanych czynnikami siłowymi i temperaturowymi dochodzą naprężenia szczytkowe spowodowane zmianami strukturalnymi.

Znane metody cieplne obniżania naprężeń szczytkowych (wyżarzanie, odpuszczanie, starzenie sztuczne) są kosztowne i energochłonne, natomiast obróbka wibracyjna charakteryzuje się małą energochłonnością, jest prosta i ekonomiczna.

Proces obróbki wibracyjnej polega na zastosowaniu zmiennych według znaku obciążeń o określonej amplitudzie, częstotliwości i kształcie drgań. Efektywność obróbki wibracyjnej można zwiększyć w oparciu o diagnostykę procesów relaksacyjnych w procesie drgań oraz sterowanie przy uwzględnieniu parametrów technologicznych, zawierających nie tylko częstotliwość i amplitudę obciążenia harmonicznego, lecz również rozmieszczenie podpór i wibratora wzdłuż wału, wykorzystanie mas dodatkowych ze sterowalnymi współczynnikami sztywności i ich powiązań z półfabrykatem.

Przejście struktury metalu w stan równowagi następuje przy wzroście jego energii ogólnej w wyniku przekazanej mu energii w postaci cieplnej lub mechanicznej.

Należy przy tym analizować zmianę naprężeń szczytkowych pierwszego rodzaju, określających geometrię części, na którą właśnie one wpływają.

W przypadku, kiedy suma naprężeń szczytkowych i naprężeń pochodzących od obciążenia cyklicznego przewyższy granicy proporcjonalności odkształceń mikroplastycznych, naprężenia szczytkowe ulegają zmniejszeniu. Przy tym, w wyniku efektu Bauschingera, granica proporcjonalności przy obciążeniach cyklicznych jest niższa o 20 % niż przy statycznych.

## 2. UZASADNIENIE METODY OBRÓBKII WIBRACYJNEJ WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

Proces relaksacji naprężeń powiązany jest z przemieszczeniami mikroskopijnymi wskutek energii dostarczanej przez drgania. Największe naprężenia mechaniczne powstają w strefach maksymalnych odkształceń sprężystych, to znaczy w strefach przeciwwęzłów. Relaksacja naprężeń przebiega w nich bardziej intensywnie niż w węzłach drgań. Odkształcenia nierównomiernie rozkładają się wzdłuż półfabrykatu.

Energia drgań w materiale półfabrykatu ulega rozproszeniu, przekształcając się w energię cieplną. Część energii sprężystej odkształceń przechodzi w energię odkształceń plastycznych i prowadzi do relaksacji naprężeń szczytkowych. Im większa jej ilość jest pochłaniana przez materiał półfabrykatu, tym intensywniej przebiega proces relaksacji. Na tych odcinkach proces wydzielania ciepła przebiega intensywniej. Daje to możliwość kontroli procesu obróbki wibracyjnej z uwzględnieniem rozkładu odcinków o różnej intensywności procesów relaksacyjnych, a niekoniecznie integralnie w całej objętości części.

Mechanizm przekształcenia energii sprężystej w ciepłą określaną jest tarcie wewnętrzne, które charakteryzuje się współczynnikiem pochłaniania  $\psi$  [1, 2]:

$$\psi = \frac{\Delta W}{W}, \quad (1)$$

gdzie  $\Delta W$  - energia, rozproszona w ciągu jednego okresu drgań w całej objętości próbki;

$W$  - energia drgań, określana wartościami amplitudowymi naprężeń i odkształceń.

Wielkość tarcia wewnętrznego podczas obróbki wibracyjnej można określić według zależności [2]:

$$Q^{-1} = c \frac{I}{\varphi_0 \cdot \nu_0^2}, \quad (2)$$

gdzie:  $c$  – stała;  $I$  – natężenie prądu napędu wibratora;  $\varphi_0$  – amplituda rezonansowa odkształceń;  $\nu_0$  – częstotliwość rezonansowa.

Przy diagnostyce procesu obróbki wibracyjnej w oparciu o zmianę natężenia prądu kontrolowana jest relaksacja naprężeń, związana ze zmianą tarcia wewnętrznego. Diagnostyka temperaturowa procesu daje możliwość sterowania parametrami technologicznymi stanowiska, umożliwia przemieszczenie odcinków o temperaturze maksymalnej (stref przeciwwęzłów). Obróbka jest prowadzona do momentu, kiedy wielkość tarcia wewnętrznego zmienia się w czasie (zachodzi proces odkształceń mikroplastycznych).

Efekt obróbki wibracyjnej można zwiększyć w wyniku zastosowania maksymalnej amplitudy odkształceń na odcinkach rezonansowych.

Obróbka wibracyjna półfabrykatu może być prowadzona przy wykorzystaniu różnorodnych drgań: zginających, wzdłużnych i skręcających. Wykonano stanowisko wibracyjne do obróbki wałów o małej sztywności, umożliwiające wykorzystanie wszystkich form drgań. Zastosowano wibrator elektromechaniczny jako najprostszy w sterowaniu i nie stawiający wysokich wymagań eksploatacyjnych.

Oddziaływanie na półfabrykat realizowane jest poprzez kompleksowe wibracje wzdłużno - skręcające i poprzeczno - skręcające. W wyniku tego w materiale półfabrykatu powstają dwie fale odkształceń wzdłużnych i przemieszczeniowych. W związku z różnymi prędkościami rozprzestrzeniania się tych odkształceń, przy tej samej częstotliwości oddziaływania wynikających z rozmieszczenia przeciwwęzłów i węzłów tych fal, różnią się one wzajemnie. Generowane są kompleksowe drgania wzdłużno - skręcające przy pomocy przemiennika falowodowego, wykonanego w postaci pręta z rowkiem śrubowym [3], który na sztywno zamocowany jest na półfabrykacie. Działanie wibratora elektromechanicznego i rowka śrubowego przemiennika falowodowego powoduje, że wzdłużne przemieszczenie czoła, na które działa wibrator, przekształcane jest w kompleksowe wzdłużno - skręcające drgania półfabrykatu.

Wibrator kompleksowych drgań skręcająco - zginających mocowany jest na półfabrykacie w określonym przekroju. Składa się z napędu elektrycznego – silnika o maksymalnej prędkości obrotowej 3000 obr./min, przymocowanego do kołnierza reduktora- multiplikatora, który zwiększa prędkość obrotową wału roboczego do 6000 obr./min. Do wału roboczego przymocowano dwie masy mimośrodowe. Płaszczyzny działania niewyważenia są symetrycznie przesunięte odnośnie osi wzdłużnej półfabrykatu. W wyniku regulacji wzajemnego położenia mas mimośrodowych wytwarzane są momenty zginający i skręcający. Przemieszczenie mimośrodu umożliwia uzyskanie siły zakłócającej w szerokim zakresie od 0 do 9000 N. Do silnika podłączony jest blok sterowania w postaci przetwornika częstotliwościowego, umożliwiający regulowanie częstości obrotowej mimośrodów, a także diagnostykę procesu obróbki wibracyjnej.

Półfabrykat ustawiany jest na podporach podwieszanych o regulowanej sztywności, na których jest ustawiany sprężyste, tak, aby nie mógł się obracać i przemieszczać w kierunku poprzecznym.

Zwiększenie amplitudy drgań na wysokich częstotliwościach roboczych umożliwia zastosowanie dodatkowych mas, zamocowanych sprężyste do półfabrykatu w określonym przekroju.

Regulując wielkość mas dodatkowych i współczynnik sztywności ich powiązania z półfabrykatem można sterować obróbką wibracyjną w taki sposób, aby węzły i przeciwwęzły przemieszczały się wraz z długością, a intensywność drgań w każdym przekroju przy tej samej częstotliwości była jednakowa. Dąży się więc, aby w każdym przekroju poprzecznym wału dla danej częstotliwości rozmieszczony był przeciwwęzeł drgań o przykładowo równej amplitudzie.

Przy obróbce partii półfabrykatów jako dodatkową masę można zastosować półfabrykat, podwieszony do półfabrykatu, do którego przymocowany jest wibrator (do drgań zginających). W wyniku zmniejszeniu ulega czas obróbki, wzrasta wydajność i równomierność procesu obróbki półfabrykatu.

Miejsca rozmieszczenia podpór lub zawieszki należy wybrać z uwzględnieniem parametrów konstrukcyjnych półfabrykatu (długości i średnicy szyjek). Po pierwsze, wibrator nie powinien tworzyć przegubów plastycznych, ponieważ w tym przypadku w wyniku działania ciężaru własnego półfabrykatu i wibratora powstają naprężenia, które po zsumowaniu się z naprężeniami okresowymi wibratora mogą przekroczyć granicę plastyczności. Przy tym rozkład stanu naprężonego, powstałego w przekroju poprzecznym półfabrykatu, nie jest równomierny z powodu oddziaływania ciężaru półfabrykatu i wibratora. Po drugie, miejsce umieszczenia wibratora uzależnione jest od częstotliwości roboczej obróbki. Częstotliwość wibracyjnego oddziaływania wybierana jest przy uwzględnieniu częstotliwości własnych półfabrykatu. Najbardziej efektywna jest obróbka materiału przy 2 lub 3 harmonice drgań własnych półfabrykatu. Jeżeli specyfika konstrukcyjna półfabrykatu powoduje, że ma on niskie częstotliwości własne, to obróbka wibracyjna może być realizowana na 3 harmonie, ale większość półfabrykatów można obrabiać na 2 harmonie. Ustawienie wibratora w miejscach przeciwwęzłów gwarantuje maksymalną amplitudę podczas obróbki wibracyjnej, przy której powstają niezbędne naprężenia okresowe przy minimalnej energochłonności. W tym przypadku na sam wibrator działają znaczne obciążenia dynamiczne. Do przedłużenia czasu eksploatacji urządzenia wibracyjnego celowe jest umieszczenie go w węzłach drgań, lecz intensywność drgań w tym przypadku jest mniejsza. Umieszczenie wibratora w innych miejscach jest mniej efektywne z powodu intensyfikacji fal przemieszczeń poprzecznych i ich wzajemnego gaszenia. Natomiast miejsca podpór należy wybierać w węzłach przemieszczeń.

Częstotliwość oddziaływania zakłócającego zmieniana jest przy pomocy bloku sterowania (przekształtnika częstotliwościowego), w sposób płynny od zera do maksymalnie możliwej wartości. Określone są częstotliwości rezonansowe, przy których częstotliwość oddziaływania nie wzrasta. Obróbka wykonywana jest do momentu zmniejszenia dla każdej z częstotliwości rezonansowej siły prądu o 15-20 %. Obróbką wibracyjną można sterować według prędkości przemieszczania się szczytu rezonansowego [4], rejestrując ekstremum mocy napędu i prędkość jego zmiany. Jeżeli siła prądu nie zmniejsza się lub prędkość przemieszczenia ekstremum zmniejsza się poniżej ustalonej granicy, kończy się obróbkę na danej częstotliwości. Zmniejsza się płynnie częstotliwość oddziaływania do zera, rejestrując zmianę częstotliwości własnych, po czym wibrator ustawiany jest w innym przekroju.

Z punktu widzenia częstotliwości oddziaływania obróbka na wyższych częstotliwościach harmonicznym jest bardziej efektywna, ponieważ współczynnik absorpcji ulega zwiększeniu ze wzrostem częstotliwości harmonicznej własnej, z którą rezonuje obciążenie zakłócające [2]:

$$\psi = \frac{2\pi \cdot \eta}{E} v_n, \quad (3)$$

gdzie:  $\eta$  - współczynnik lepkości materiału;

$v_n$  - częstotliwość własna n-tej częstotliwości harmonicznej.

Przy obróbce wibracyjnej na wyższych harmonikach rozkład węzłów i przeciwwęzłów wraz z długością półfabrykatu jest częstszy. Amplituda rezonansowa na wyższych harmonikach ma mniejszą wartość, a więc naprężenia powstające przy odkształceniach będą mniejsze. Jednak w tym przypadku wzrasta współczynnik pochłaniania, co powoduje, że obróbka półfabrykatu jest bardziej równomierna. Z drugiej strony, aby uzyskać rezonans przy wyższych harmonikach, należy zastosować wibrator wysokoobrotowy. Zwiększenie niewyważenia niezbędne do zwiększenia amplitudy drgań ograniczone jest przyczynami konstrukcyjnymi

(obciążenia łożysk, ograniczona moc napędu), co oznacza, że aby uzyskać maksymalną relaksację naprężeń szczytkowych  $T$ , należy optymalizować przy obróbce wibracyjnej stosunek amplitudy i częstotliwości.

Efektywność obróbki wibracyjnej zależy od wartości i miejsca przyłożenia siły wymuszającej, kształtu geometrycznego części, częstotliwości i kształtu drgań roboczych. Metodą parametrów początkowych przeprowadzono badanie wpływu podpór dodatkowych, mas dodatkowych zamocowanych sprężysto na półfabrykacie oraz ich rozmieszczenia, a także częstości oddziaływania na położenie stref przeciwwęzłów i węzłów drgań zginających, jako maksymalnie wpływających na relaksację naprężeń.

Przy sterowaniu macierzowym wiążącym przekroje graniczne, przyjęto podpory sprężyste [5]:

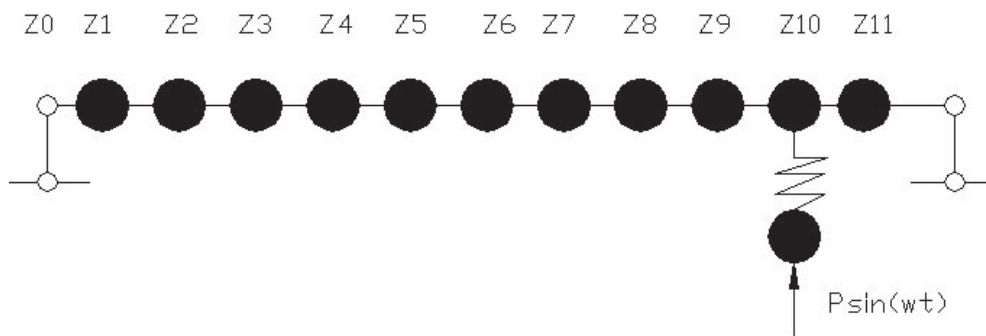
$$\begin{pmatrix} Y_n \\ \varphi_n \cdot l \\ \frac{M_n \cdot l^2}{EJ} \\ \frac{Q_n \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_0 \\ \varphi_0 \cdot l \\ \frac{M_0 \cdot l^2}{EJ} \\ \frac{Q_0 \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

gdzie:  $EJ$  - wytrzymałość na zginanie odcinka wału;

$l$  - długość wału;

$y_i$ ,  $\varphi_i$ ,  $Q_i$  i  $M_i$  - przemieszczenie poprzeczne, kąt obrotu, siła poprzeczna i moment zginający w  $i$  przekroju;

$a_{jk}$  - współczynniki macierzy przekoszenia.



Rys. 1. Schemat obliczeniowy obróbki wibracyjnej

Wibrator oddziałujący siłą zmienną na półfabrykat przyjmujemy jako masę sprężysto podwieszoną do wału (rys.1). Współczynnik sztywności powiązania masy i wału określany jest wielkością zaciśnięcia mechanizmu mocującego i jego specyfiką konstrukcyjną. Amplituda siły określana jest wielkością niewyważenia masy mimośrodowej.

Dla odcinka pręta z dwoma masami skupionymi: jedna zamocowana na sztywno, a druga sprężysto, na który oddziałuje skupiona siła harmoniczna, zależność między parametrami w przekrojach  $i$  i  $i-1$  ma postać:

$$Y_i = J_i Y_{i-1} + \Lambda_i, \quad (5)$$

gdzie

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{P_i \cdot c_i \cdot l^3}{EJ(-m_i \cdot \Omega^2 + c_i)} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

gdzie  $P_i$  - amplituda siły harmoniczej zmieniająca się z częstotliwością  $\Omega$ ,  
 $m_i$  - masa, zamocowana sprężysto na wale do której przyłożona jest siła harmoniczna;  
 $c_i$  - współczynnik sztywności zamocowania sprężystego:

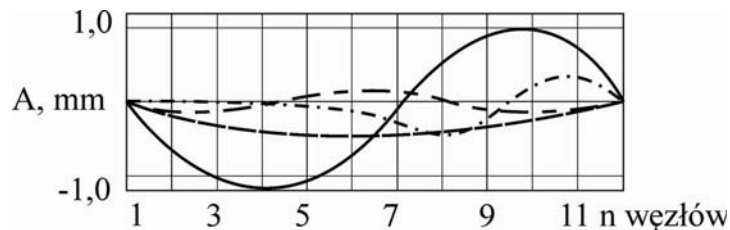
$$J_i = \begin{pmatrix} 1 & h_i & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} & \frac{h_i^3}{6 \cdot u_i} \\ 0 & 1 & \frac{h_i}{u_i} & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} \\ 0 & 0 & 1 & h_i \\ \tau_i & \tau_i \cdot h_i & \frac{\tau_i \cdot h_i^2}{2 \cdot u_i} & 1 + \frac{\tau_i \cdot u_i^3}{6 \cdot u_i} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

gdzie:  $h_i = l_i/l$ , gdzie  $l_i$  - długość  $i$ -go odcinka,  
 $l$  - długość całej części;  $u_i = EJ_i/EJ$ , gdzie  $EJ_i$  - odporność na zginanie  $i$ -go odcinka;

$$\tau = \frac{m_i^* \omega^2 l^3}{EJ} + \frac{c_i m_i \omega^2 l^3}{EJ(c_i - m_i \omega^2)} - \text{gdzie } m_i^* - \text{masa na sztywno}$$

zamocowana na wale.

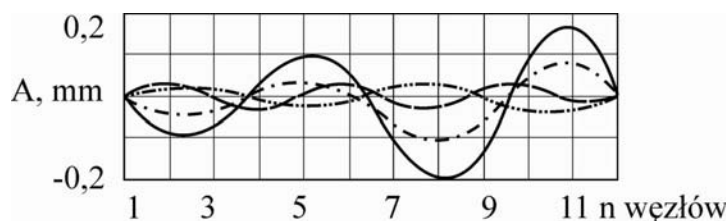
Przy zastosowaniu danego algorytmu stosującego metodę parametrów początkowych w postaci macierzowej, przeanalizowano przy zastosowaniu programu Mathcad obróbkę wibracyjną dla różnych schematów ustawienia półfabrykatu i parametrów obciążenia.



Rys. 2. Ugięcia osi półfabrykatu dla różnych warunkach obróbki (częstotliwości):

- drżania o częstotliwości  $\omega=2$  rad/s, siła zakłócająca  $F=10$  N,  $m=5$ kg, sztywność powiązania  $k=100000$  N/m, węzeł rozmieszczenia wibratora - Z10 (----);
- $\omega=5$  rad/s,  $F=10$  N,  $m=5$  kg,  $k=100000$  N/m, Z10 (—);
- $\omega=5$  rad/s,  $F=100$  N,  $m=5$  kg,  $k=1000$  N/m, Z6 (— · — · —);
- $\omega=15$  rad/s,  $F=100$  N,  $m=5$  kg,  $k=100000$  N/m, Z10 (— · — · —)

Metodą parametrów początkowych uzyskano ugięcia osi półfabrykatu przy różnych parametrach technologicznych obróbki wibracyjnej [4], przedstawione na rys. 2 i 3.



Rys. 3. Ugięcia osi półfabrykatu dla różnych warunków obróbki (położenia wibratora i zastosowania mas dodatkowych): e)  $\omega=25$  rad/s,  $F=100$  N,  $m=5$  kg,  $k=100\,000$  N/m, Z10, węzeł zamocowania dodatkowej masy Z5 (-----); f)  $\omega=25$  rad/s,  $F=100$  N,  $m=5$  kg,  $k=100\,000$  N/m, Z10 (— — —); g)  $\omega=25$  rad/s,  $F=100$  N,  $m=8$  kg,  $k=100$  N/m, Z6, węzły zamocowania mas dodatkowych Z3,Z10 (— · — · —); h)  $\omega=25$  rad/s,  $F=100$  N,  $m=25$  kg,  $k=1000$  N/m, Z6; węzeł zamocowania masy dodatkowej Z4 (—)

Jak widać w wyniku zmiany częstotliwości oddziaływania, przemieszczenia wibratora wzdłuż półfabrykatu i zastosowania mas dodatkowych można uzyskać przemieszczenie stref przeciwwęzłów. Do uzyskania równomierności obróbki materiału wału w przekroju poprzecznym należy półfabrykat obracać wokół jego osi wzdłużnej.

### 3. PODSUMOWANIE

W procesie badania urządzenia w OAO „Azotremmasz” (m. Togliatti) ustalono, że przy oddziaływaniu na wał harmonicznego siły zakłócającej o amplitudzie  $F=400$  N o różnych częstotliwościach rezonansowych w czasie około jednej minuty półfabrykat nagrzewa się lokalnie w miejscach przeciwwęzłów przemieszczania harmoniki od temperatury pokojowej (około  $20$  °C) do  $90$  °C (temperatura maksymalna). W węzłach przemieszczeń temperatura zwiększa się nieznacznie. Po 10 minutach obróbki wibracyjnej temperatura na długości wału stopniowo wyrównuje się dzięki przewodności cieplnej, przy zachowaniu różnicy w przeciwwęzłach i węzłach od  $2$  °C do  $4$  °C.

Kontrola położenia stref rezonansu umożliwia określenie miejsc najbardziej intensywnej relaksacji naprężeń i sterowanie ich przemieszczeniami w wyniku zastosowania mas dodatkowych. Zmieniając parametry technologiczne obróbki wibracyjnej (częstość oddziaływania, sztywność i inercyjność półfabrykatu) można sterować stopniem obróbki każdego jego odcinka, kontrolując położenie i przemieszczenia stref nagrzewania wstępnego, to znaczy stref przeciwwęzłów.

Obróbka wibracyjna przy zastosowaniu wibratora elektromechanicznego w OAO „Azotremmasz” okazała się bardziej efektywna niż operacje obróbki cieplnej, umożliwiając zmniejszenie poziomu naprężeń w częściach o małej sztywności typu wały - wirników. Paczenie wału zmniejsza się od 1, 5 do 2 razy w porównaniu z obrobionym zgodnie z technologią tradycyjną.

### LITERATURA:

1. Draczow O., Taranenko W., Halas W., Taranenko G.: Sterowanie obróbką wibracyjną wałów o małej sztywności. PAR 2/2008, Warszawa 2008, s. 224-227.
2. Постников В. С. Внутреннее трение в металлах. - М.: Металлургия, 1974. 23 с.,
3. Патент № 2169058 РФ, МКИ В23В29/03. Устройство для обработки глубоких отверстий.
4. А. с. № 113583 Способ виброобработки детали. В.Г. Горенко и др., 1985. БИ №3.
5. Ивович В. А. Переходные матрицы в динамике упругих систем. М.: Машиностроение, 1969. 199 с.