

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ДОВОДКИ ШАРИКОВ

С целью выяснения влияния частоты вращения n доводочного диска, рабочего давления P и динамических свойств доводочного станка на процесс доводки были проведены экспериментальные исследования на безэлеваторном стенде, причем подвижный диск устанавливался на опоры различного типа: обычный упорный шарикоподшипник и гидростатический подшипник.

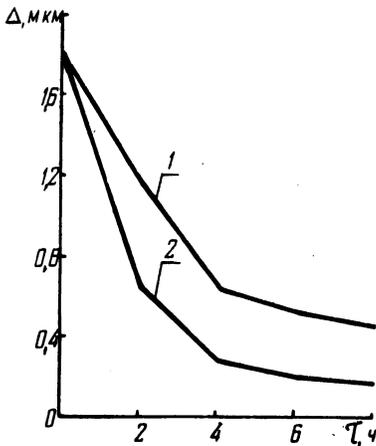


Рис. 1. Изменение погрешности геометрической формы Δ во времени:

1 — обычный метод; 2 — новый метод.

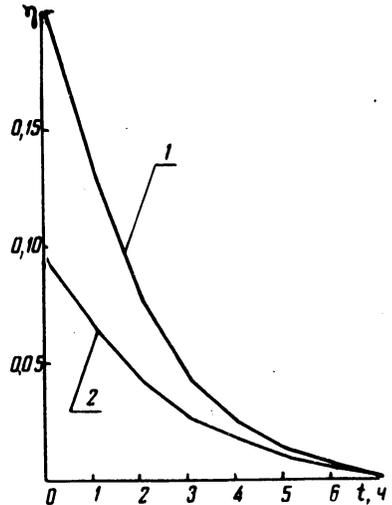


Рис. 2. "Относительное опережение" шариков относительно доводочных дисков η во времени:

1 — обычный метод; 2 — новый метод.

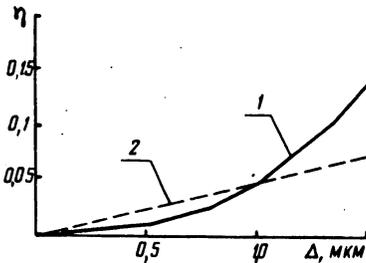


Рис. 3. "Относительное опережение" шариков относительно доводочных дисков в зависимости от погрешности геометрической формы:

1 — обычный метод; 2 — новый метод.

В результате экспериментальных исследований доводки шариков при различных условиях были получены следующие зависимости: изменение погрешности геометрической формы (некруглость) шариков во времени (рис. 1); "относительное опережение" шариков относительно доводочных дисков η во времени (рис. 2) и в зависимости от погрешности геометрической формы Δ (рис. 3). Под "относительным опережением" понимаем

$$\eta = \frac{i_T - i}{i},$$

где $i_T = 1,85$; $i = \frac{\omega_D}{\omega_{Ц.Ш}}$; ω_D — частота вращения доводочного диска, об/с; $\omega_{Ц.Ш}$ — частота вращения центра шариков, об/с.

Вид графиков зависимости некруглости Δ от времени обработки τ шариков позволяет предположить, что наилучшим образом результаты экспериментов могут быть описаны моделью вида

$$\Delta = \Delta_0 - a_0 (1 - e^{a_1 \tau}), \quad (1)$$

где Δ_0 — начальная погрешность геометрической формы шариков; a_0 — параметр, характеризующий допустимую точность доводки $\Delta_{ост}$, т.е. при $\tau \rightarrow \infty$ $\Delta_{ост} = \Delta_0 - a_0$; (2)

a_1 — параметр, характеризующий производительность доводки, (чем больше a_1 , тем скорее $\Delta = \Delta_{ост}$).

В результате математической обработки экспериментальных данных были найдены вид и параметры зависимости параметров модели (1) от частоты вращения нижнего доводочного диска n и рабочего давления P :

$$a_0 = f_1(n, P);$$

$$a_1 = f_2(n, P).$$

Для обычного метода:

$$a_0 = -0,155 + 0,979n + 1,39 \cdot 10^{-3}P - 0,29n^2 - 5,93 \cdot 10^{-7}P^2; \quad (3)$$

$$a_1 = -1,295 + 0,239n + 1,369 \cdot 10^{-3}P - 0,116n^2 - 4,97 \cdot 10^{-7}P^2. \quad (4)$$

Для нового метода:

$$a_0 = 1,28 - 0,1979n + 1,02 \cdot 10^{-3}P + 0,05n^2 - 0,48 \cdot 10^{-6}P^2; \quad (5)$$

$$a_1 = 0,1484 - 0,736n + 0,196n^2 + 0,1305 \cdot 10^{-4}P - 0,365 \cdot 10^{-8}P^2. \quad (6)$$

Данные зависимости позволяют определить оптимальное сочетание значений частоты вращения доводочного диска n и усилия прижима P с точки зрения достижимой точности и максимальной производительности процесса доводки шариков.

Согласно уравнению (2), остаточная погрешность геометрической формы шариков будет минимальной, когда a_0 достигнет максимального значения. Тогда оптимальное сочетание $P_{\text{опт}1}$ и $n_{\text{опт}1}$ можно определить из условия

$$\frac{\partial a_0}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial a_0}{\partial P} = 0. \quad (7)$$

Подставляя в уравнение (7) значения a_0 из уравнения (3), получим для обычного метода доводки

$$\begin{aligned} 0,979 - 0,294 \cdot 2n &= 0; \\ 1,39 \cdot 10^{-3} - 5,93 \cdot 10^{-7} \cdot 2P &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Откуда

$$n_{\text{опт}} = 1,665 \text{ об/с}; \quad P_{\text{опт}} = 1290 \text{ Н}.$$

Аналогично для нового метода

$$\begin{aligned} -0,178 + 2 \cdot 0,05 \cdot n &= 0; \\ 1,02 \cdot 10^{-3} - 0,48 \cdot 10^{-6} \cdot 2P &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Откуда

$$n_{\text{опт}} = 1,98 \text{ об/с}; \quad P_{\text{опт}} = 1060 \text{ Н}.$$

Величины оптимальных значений частоты вращения доводочного диска $n_{\text{опт}}$ и рабочего давления $P_{\text{опт}}$, дающие наибольшую производительность, определяются из условий

$$\frac{\partial a_1}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial a_1}{\partial P} = 0. \quad (10)$$

Подставляя значения a_1 из уравнения (4) в уравнение (10), получим для обычного метода

$$\begin{aligned} 0,2329 - 2 \cdot 0,1166 n &= 0; \\ 1,369 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 4,97 \cdot 10^{-7} \cdot P &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Откуда

$$n_{\text{опт}} = 1 \text{ об/с}; \quad P_{\text{опт}} = 1380 \text{ Н}.$$

Аналогично для нового метода

$$\begin{aligned} -0,7362 + 2 \cdot 0,1962 n &= 0; \\ 0,1305 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 0,365 \cdot 10^{-8} P &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Откуда

$$n_{\text{опт}} = 1,88 \text{ об/с}; \quad P_{\text{опт}} = 1850 \text{ Н.}$$

Достижимая точность доводки шариков для двух методов, согласно уравнениям (2, 3, 5), с учетом оптимальных значений параметров частоты вращения n и рабочего давления P будет: для обычного метода — $\Delta_{\text{ост}} = 0,277$ мкм; для нового метода — $\Delta_{\text{ост}} = 0,144$ мкм.

Значения параметра a_1 , характеризующего производительность доводки, с учетом оптимальных значений параметров n и P , согласно уравнениям (4, 6), будут: для обычного метода — $a_{11} = -0,2359$; для нового метода — $a_{12} = -0,5790$.

Вид графиков зависимости "относительного опережения" η во времени τ позволяет предположить, что наилучшим образом результаты экспериментов могут быть описаны моделью вида

$$\eta = \eta_0 - a_0 (1 - e^{a_1 \tau}), \quad (13)$$

где

$$a_0 = f_1(n, P);$$

$$a_1 = f_2(n, P).$$

После математического анализа экспериментальных данных были найдены следующие функциональные зависимости.

Для обычного метода:

$$a_0 = 0,337 - 0,231n + 0,763 \cdot 10^{-4}P + 0,0744n^2 - 0,1186 \cdot 10^{-7}P^2; \quad (14)$$

$$a_1 = -0,463 + 0,215n - 0,45 \cdot 10^{-3}P - 0,139n^2 + 0,206 \cdot 10^{-6}P^2. \quad (15)$$

Для гидростатической опоры:

$$a_0 = 0,096 - 0,0218n + 0,19 \cdot 10^{-4}P - 0,17 \cdot 10^{-3}n^2 + 0,913 \cdot 10^{-8}P^2; \quad (16)$$

$$a_1 = -0,441 + 0,035n - 0,26 \cdot 10^{-3}P - 0,953 \cdot 10^{-2}n^2 - 0,73 \cdot 10^{-7}P^2. \quad (17)$$

Вид графиков зависимости "относительного опережения" η от некруглости Δ позволяет предположить, что наилучшим образом результаты опытов могут быть описаны моделью вида

$$\eta = \Delta(a_1 + a_2 \Delta), \quad (18)$$

где

$$a_1 = f_1(n, P), \quad a_2 = f_2(n, P).$$

Математический анализ экспериментальных данных показал, что:

для обычной опоры

$$a_1 = -0,243 + 0,206n + 0,88 \cdot 10^{-4} \cdot P - 0,552n^2 - 0,528 \cdot 10^{-7} \cdot P^2; \quad (19)$$

$$a_2 = 0,252 - 0,201n - 1,474 \cdot 10^{-5} \cdot P + 0,058n^2 + 0,224 \cdot 10^{-7} \cdot P^2; \quad (20)$$

для гидростатической опоры

$$a_1 = -0,014 + 0,005 \cdot n + 0,827 \cdot 10^{-4} \cdot P - 0,0008 \cdot n^2 - 0,449 \cdot 10^{-7} \cdot P^2. \quad (21)$$

$$a_2 = -0,054 - 0,024n - 0,442 \cdot 10^{-4} \cdot P + 0,004n^2 + 0,298 \cdot 10^{-7} \cdot P^2. \quad (22)$$

Полученные результаты анализа методов доводки и математических моделей этих методов дают возможность сделать следующие выводы:

1. Математическая модель процесса доводки шариков позволяет определить оптимальные значения параметров доводки.

2. Наибольшую точность и производительность дает доводка шариков при установке подвижного диска на гидростатической опоре. Достижимая точность доводки с использованием гидростатической опоры в 2,5 раза, а производительность процесса (при одинаковых требованиях к точности) в 2 раза выше, чем с обычной опорой.

3. Оптимальные значения рабочего давления P , обеспечивающие максимальную производительность и точность доводки, существенно различны. Поэтому рекомендуется начинать процесс при значениях рабочего давления P , обеспечивающих максимальную скорость исправления погрешности геометрической формы, а через время, соответствующее 0,25...0,35 длительности цикла, изменять значение P до величины, обеспечивающей максимальную точность доводки.

4. Наличие тесной корреляционной связи между погрешностью формы и "относительным опережением" шариков позволяет построить адаптивную систему управления процессом, изменяющую, с целью повышения производительности и качества доводки, величину рабочего давления и частоты вращения диска в зависимости от мгновенного усредненного значения погрешности формы.