

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОЙ ЛИНИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОСИ ВАЛА ПРИ ТОЧЕНИИ

Д. Г. Шатуров, В. В. Баранова, Г. Ф. Шатуров

Предложена математическая зависимость для определения расположения экстремума упругой линии перемещений оси вала при точении. Приведенные результаты исследований позволяют осуществить управление диаметральной точностью поверхностей валов при обработке.

Ключевые слова: обработка, резец, перемещение оси вала, передняя и задняя бабки станка

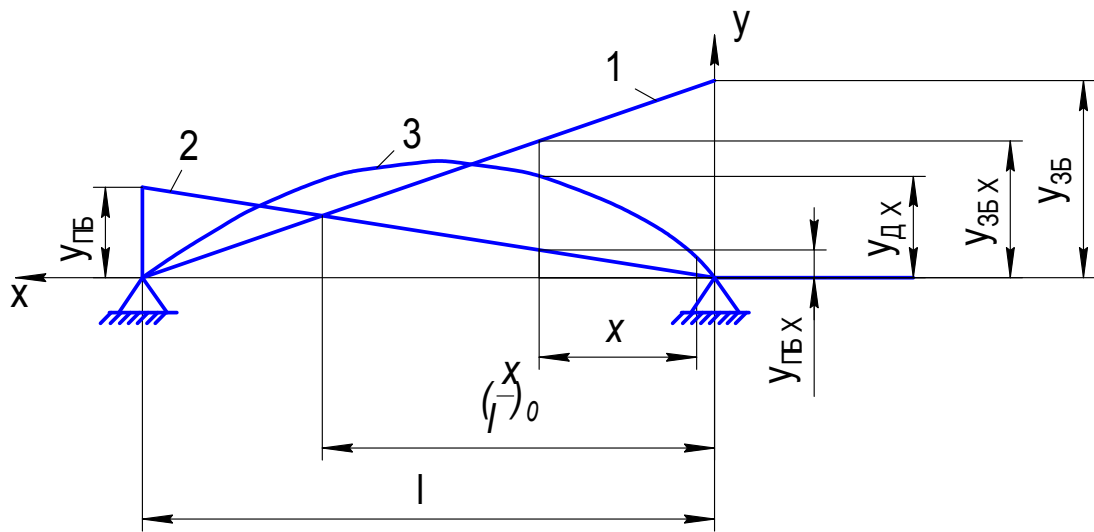
Сдерживающим фактором внедрения на предприятиях машиностроения чистового точения валов призматическими резцами является образование погрешностей, связанных с упругими деформациями элементов технологической системы (ТС). Действие радиальной составляющей силы резания вызывает значительные упругие деформации элементов ТС в процессе точения, что увеличивает погрешность обработки. Упругие деформации связаны с жесткостью приспособления, инструмента, суппорта, заготовки, передней и задней бабок станка (опор заготовки). Если упругая деформация первых трёх элементов незначительна и ею можно пренебречь или учесть при настройке [1], то упругую деформацию заготовки и её опор необходимо учитывать при расчете операции на точность обработки.

Упругое перемещение оси заготовки относительно вершины резца, возникающее под действием радиальной составляющей силы резания, определяется по следующей формуле.

$$Y_x = Y_{z\delta_x} + Y_{n\delta_x} + Y_{\delta_x}, \quad (1)$$

где Y_x - радиальное смещение оси вала относительно вершины резца в рассматриваемом сечении вала;

$Y_{z\delta_x}, Y_{n\delta_x}, Y_{\delta_x}$ - упругоеотжатие задней бабки, передней бабки (опор заготовки) станка и оси вала в сечении x соответственно (Рисунок 1).



1 – задней опоры вала; 2 – передней опоры вала; 3 – оси заготовки; $U_{нб}$, $U_{зб}$ – максимальные упругие деформации передней и задней бабок станка (опор заготовки)

Рис. 1. Упругие деформации технологической системы

В связи с тем, что упругие отжатия элементов ТС изменяются при обработке заготовки, ее диаметр и форма оказываются переменными по длине. Тогда диаметральная погрешность или величина отклонения профиля продольного сечения определяется как наибольшая разность между наибольшим и наименьшим диаметром детали [1].

$$\Delta D = 2(Y_x - Y_0), \quad (2)$$

где ΔD – диаметральная систематическая погрешность в продольном сечении вала;

Y_0 – упругая деформация наиболее податливой задней бабки станка (опоры вала).

Индивидуальная настройка резца на размер происходит в начале обработки, где имеет место максимальная упругая деформация наиболее податливой задней бабки станка.

Определение максимальной погрешности связано с определением лимитирующего сечения по длине вала, в котором имеет место минимальное упругое перемещение оси вала, т.е. $Y_x = Y_x^{\min}$. Лимитирующим сечением будем называть такое диаметральное сечение вала, расположенное вдоль его оси от задней опоры, в котором имеет место минимальное упругое перемещение оси заготовки, относительно которого определяется максимальная погрешность обработки. В [2] установлено, что при обработке жестких валов ($l/d \leq 10$), когда их жесткость не учитывается, наименьшее перемещение

оси вала располагается между его серединой и передним (левым) торцом на расстоянии равном

$$\left(\frac{x}{l}\right)_0 = \frac{\omega_{зб}}{\omega_{зб} + \omega_{нб}}, \quad (3)$$

где $\left(\frac{x}{l}\right)_0$ - расположение лимитирующего сечения вала от начала обработки (от правого торца вала);

$\omega_{зб}, \omega_{нб}$ - податливость задней и передней бабок станка (опор вала) соответственно, $мкм/Н$.

Расположение лимитирующего сечения удобнее определять по следующей формуле

$$\left(\frac{x}{l}\right)_s = 1 - \frac{x}{l}, \quad (4)$$

где $\left(\frac{x}{l}\right)_s$ - расположение лимитирующего сечения от правого торца вала;

$\frac{x}{l}$ - расположение лимитирующего сечения от левого торца вала.

Тогда можно записать (Рисунок 1).

$$Y_x = P_y \left[\left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \omega_{нб} + \left(\frac{x}{l}\right)^2 \omega_{зб} + \omega_g \left(\frac{x}{l}\right)^2 \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \right], \quad (5)$$

$$\omega_g = \frac{l^3 \cdot 10^4}{3EJ}, \quad (6)$$

где P_y - радиальная составляющая силы резания, $Н$;

ω_g - податливость заготовки, $мкм/Н$;

l - длина вала, $см$;

E - модуль упругости материала заготовки, $E = 2 \cdot 10^7 Н/см^2$ (для стали);

J - момент инерции заготовки, $J = 0,05d^4$;

d - диаметр вала, $см$.

Для шарнирно-опертой балки при изгибе можно всегда принимать за уравнение изогнутой оси уравнение синусоиды с одной полуволной [3].

Тогда (4) предстанет в следующем виде

$$Y_x = P_y \left[\left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \omega_{n\delta} + \left(\frac{x}{l}\right)^2 \omega_{з\delta} + \omega_{g0} \sin \pi \frac{x}{l} \right], \quad (7)$$

где ω_{g0} - податливость вала в середине при $\frac{x}{l} = 0,5$, мкм/Н.

$$\omega_{g0} = \frac{l^3 \cdot 10^4}{48EJ} = \frac{l^3}{4800d^4}. \quad (8)$$

В выражении (7) разложим $\sin \pi \frac{x}{l}$ в ряд, беря только два члена разложения.

Тогда имеем

$$Y_x = P_y \left[\left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \omega_{n\delta} + \left(\frac{x}{l}\right)^2 \omega_{з\delta} + \omega_{g0} \pi \left[\frac{x}{l} - \frac{1}{6} \pi^2 \left(\frac{x}{l}\right)^3 \right] \right]. \quad (9)$$

Для отыскания лимитирующего сечения возьмём производную $dY_x / d\left(\frac{x}{l}\right)$ и приравняем ее нулю.

В результате получим

$$-2\omega_{n\delta} + 2\omega_{n\delta} \frac{x}{l} + 2\omega_{з\delta} \frac{x}{l} + \omega_{g0} \pi - \frac{1}{2} \pi^3 \omega_{g0} \left(\frac{x}{l}\right)^2 = 0.$$

Или

$$\left(\frac{x}{l}\right)^2 - 4 \frac{\omega_{n\delta} + \omega_{з\delta}}{\pi^3 \omega_{g0}} \left(\frac{x}{l}\right) + \frac{2(2\omega_{n\delta} - \omega_{g0} \pi)}{\pi^3 \omega_{g0}} = 0. \quad (10)$$

В результате решения уравнения (10) получим

$$\frac{x}{l} = \frac{2(\omega_{зб} + \omega_{нб})}{\pi^3 \omega_{го}} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\pi^3 \omega_{го} (2\omega_{нб} - \omega_{го} \pi)}{2(\omega_{нб} + \omega_{зб})^2}} \right]. \quad (11)$$

Используя формулу (4), определяется расположение экстремального сечения от правого торца вала. Из анализа выражения (11) следует:

$$2\omega_{нб} - \omega_{го} \pi \geq 0;$$

$$\frac{\pi^3 \omega_{го} (2\omega_{нб} - \omega_{го} \pi)}{2(\omega_{нб} + \omega_{зб})^2} \leq 1,0.$$

Тогда с учетом (8) имеем:

$$\omega_{го} \leq 2 \frac{\omega_{нб}}{\pi}; \quad (12)$$

$$\left(\frac{l}{d} \right)_p \leq 14,51 \sqrt{d \omega_{нб}}; \quad (13)$$

$$l_p \leq 14,51 \cdot d \sqrt{d \omega_{нб}}; \quad (14)$$

$$\omega_{зб} \geq \sqrt{\frac{1}{2} \pi^3 \omega_{го} (2\omega_{нб} - \pi \omega_{го})} - \omega_{нб}; \quad (15)$$

$$d_p \geq \left(\frac{l}{d} \right)^3 \cdot \frac{\pi}{9600 \cdot \omega_{нб}}, \quad (16)$$

где $\left(\frac{l}{d} \right)_p$, d_p - расчетное соотношение и расчетный диаметр цилиндрической

поверхности жесткого вала, при котором имеет место наличие только одного экстремума на линии упругих перемещений оси заготовки соответственно.

В таблице 1 представлены расчетные значения длин вала, при которых будет выполняться условие наличия только одного экстремума.

Таблица 1. Влияние диаметра вала на величину его длины, обеспечивающей наличие одного экстремума упругой линии перемещений оси ($\omega_{нб} = 0,06 \text{ мкм/Н}$).

| | | | | | |
|--------------------------------|------|------|-------|------|------|
| $d, \text{ мм}$ | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 |
| $\left(\frac{l}{d}\right)_p <$ | 9,71 | 11,1 | 12,23 | 14,0 | 15,4 |
| $l_p, \text{ мм}$ | 485 | 832 | 1223 | 2100 | 3080 |

Изменение жесткости, например, задней бабки станка отдаляет величину расположения экстремума от левого торца вала, приближая его к середине заготовки (Таблица 2).

Таблица 2. Зависимость изменения расположения экстремума на кривой упругих перемещений оси вала при обработке резцом в зависимости от соотношения $\omega_{нб} / \omega_{зб}$ ($l = 1000 \text{ мм}, d = 100 \text{ мм}, \omega_{нб} = 0,06 \text{ мкм/Н}, P_y = 211 \text{ Н}$).

| | | | | | |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\frac{\omega_{нб}}{\omega_{зб}}$ | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 |
| $\omega_{зб}$ | 0,3 | 0,15 | 0,12 | 0,1 | 0,075 |
| $\left(\frac{x}{l}\right)_0$ | 0,833 | 0,71 | 0,67 | 0,625 | 0,56 |
| $\frac{x}{l}$ | 0,078 | 0,146 | 0,181 | 0,218 | 0,341 |
| $\left(\frac{x}{l}\right)_p$ | 0,92 | 0,854 | 0,82 | 0,782 | 0,659 |

Таким образом, полученные зависимости позволяют произвести расчет по определению расположения лимитирующего сечения вала и соответственно максимальной погрешности обработки.

Литература

1. Мрочек, Ж. А. Исследование точности при обработке валов в центрах на токарных станках/Ж. А. Мрочек, Г. Ф. Шатуров, Э. Н. Ясюкович, Д. Г. Шатуров//Вестн.БНТУ. – 2006. - № 3. – с. 30-34.
2. Шатуров, Г. Ф. Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей/Г. Ф. Шатуров, Ж. А. Мрочек. – Минск:Технопринт, 2001. – 460 с.
3. Беляев, Н. М. Сопротивление материалов/Н. М. Беляев. Главная редакция физ.-матем. лит.-ры изд-ва «Наука», 1976. – 608 с.