

УДК 621.97

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ВАЛОВ

UDC 621.97

D. G. Shaturov, V. V. Baranova, G. F. Shaturov

STUDY OF ERRORS IN SHAFT TURNING

Аннотация

Предложена математическая зависимость для определения расположения экстремума упругой линии перемещений оси жесткого вала в процессе обработки. Проведены исследования, позволяющие осуществить прогнозирование и управление точностью формообразования поверхностей валов при точении.

Ключевые слова:

обработка, резец, упругая деформация, перемещение оси вала, погрешность.

Abstract

The paper offers the mathematical relationship for determining the location of the extremum of an elastic line of displacements of a rigid shaft axis during machining. The studies done, allow forecasting and monitoring the precision of the formation of shaft surfaces in turning processes.

Key words:

machining, cutter, elastic deformation, displacement of shaft axis, error.

Технологическая система, состоящая из опор вала, заготовки и инструмента, в процессе токарной обработки представляет собой упругую динамическую систему, элементы которой под действием силы резания взаимно перемещаются в результате деформации, что обуславливает возникновение погрешностей обработки [1–5].

Настройка резца на размер осуществляется у менее жесткой задней бабки станка, где для жестких валов ($l/d \leq 1,0$) имеет место наибольшее упругое перемещение оси заготовки относительно линии центров станка. Сечение заготовки по ее длине, в котором наблюдается наименьшее перемещение оси вала, называют лимитирующим. Относительно этого сечения и опреде-

ляется максимальная диаметральная погрешность обработки, равная удвоенной разнице перемещений оси вала в начале обработки и в лимитирующем сечении.

Тогда погрешность размера обрабатываемой детали в сечении, отстоящем на расстоянии x от торца заготовки вала при обработке в центрах без учета износа резца,

$$\Delta D = 2(y_x - y_0), \quad (1)$$

где y_x – радиальное упругое перемещение оси вала в сечении, в котором определяется погрешность обработки; y_0 – радиальное упругое перемещение оси вала под действием радиальной силы в начале обработки при $x=0$ (рис. 1); ΔD – систематическая погреш-

ность, обусловленная наличием упругой деформации элементов технологиче-

ской системы резания.

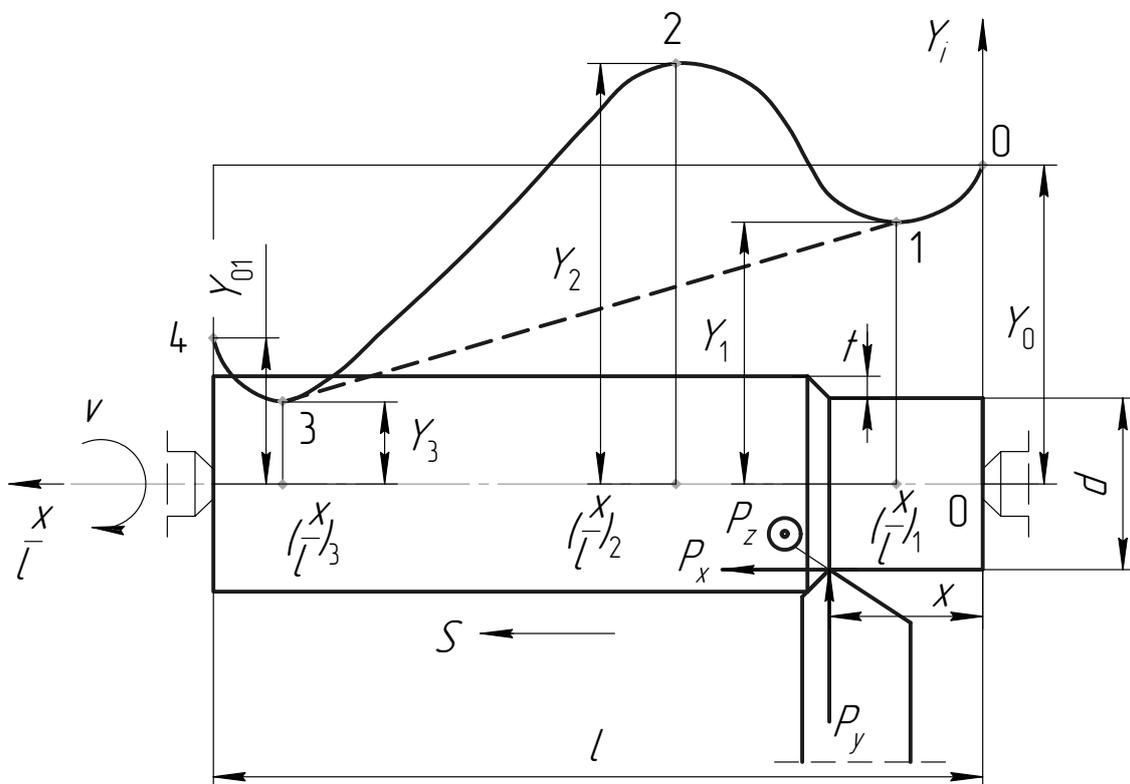


Рис. 1. Вид кривой и величина упругих перемещений оси вала в радиальной плоскости при обработке в зависимости от местоположения реза: P_x, P_y, P_z – составляющие силы резания, действующие на вал; y_0, y_1, y_2, y_3, y_4 – упругие перемещения оси вала при обработке

Величина y_x определяется из следующей зависимости [1]:

$$y_x = P_y \left[\begin{aligned} &\left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \omega_{z0} + \\ &\left(\frac{x}{l}\right)^2 \omega_{n0} + \\ &+ \omega_{g0} \left(\frac{x}{l}\right)^2 \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \end{aligned} \right], \quad (2)$$

$$\omega_{g0} = \frac{l^3 \cdot 10^4}{3E \cdot J}, \quad (3)$$

где P_y – радиальная сила резания, Н;

l – длина вала, см; $\frac{x}{l}$ – относительное

расстояние от начала обработки до сечения, в котором определяется погрешность обработки; E – модуль упругости материала заготовки, $E = 2 \cdot 10^7$ Н/см² (для стали); J – момент инерции сечения заготовки, $J = 0,05d^4$; d – диаметр вала, см; $\omega_{n0}, \omega_{z0}, \omega_{g0}$ – податливость передней, задней бабок станка (опор вала) и заготовки соответственно, мкм/Н.

В токарных станках, как правило, жесткости передней и задней бабок не равны, при этом задняя бабка менее жестка. Данное обстоятельство вносит существенную погрешность обработки. Так, для жестких валов ($l/d \leq 10$) это приводит к корсетности (см. рис. 1, линию 0–1–3–4). Прогиб вала в таком слу-

чае уменьшает погрешность более чем на 30 % [6].

Лимитирующее сечение (рис. 1, точка 3 кривой) находится на некотором расстоянии $\left(\frac{x}{l}\right)_0$ от правого торца вала

в направлении к наиболее жесткой передней опоре. Его расположение можно определить по методике, изложенной в [6]. Лимитирующее сечение – это сечение, в котором имеет место минимальное упругое перемещение оси вала относительно линии центров станка.

Неудобство известной методики состоит в том, что ее затруднительно применять в производственных условиях из-за громоздкости.

В связи с этим цель работы состоит в получении более простых математических зависимостей, использование которых осуществимо технологами в производственных условиях.

Для шарнирно-опертой балки (вала) при изгибе уравнение изогнутой ее оси можно принять как уравнение параболы с максимальным прогибом в середине, равным f_0 :

$$Y_x = 4f_0 \left[\left(\frac{x}{l}\right) - \left(\frac{x}{l}\right)^2 \right],$$

или

$$Y_x = \frac{P_y}{4} \omega_{g0} \left(\frac{x}{l}\right) \left(1 - \frac{x}{l}\right). \quad (4)$$

Тогда перемещение оси вала в любом сечении длины вала можно представить уравнением

$$y_x = P_y \left[\begin{aligned} &\left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \omega_{zб} + \\ &+ \left(\frac{x}{l}\right)^2 \omega_{нб} + \\ &+ \frac{1}{4} \omega_{g0} \left(\frac{x}{l}\right) \left(1 - \frac{x}{l}\right) \end{aligned} \right]. \quad (5)$$

Для нахождения экстремума функции возьмем производную $dy_x / d\left(\frac{x}{l}\right)$ и приравняем ее к нулю.

В результате имеем

$$\begin{aligned} &-2\omega_{zб} + 2\omega_{zб} \frac{x}{l} + 2\omega_{нб} \frac{x}{l} + \\ &+ \frac{1}{4} \omega_{g0} - \frac{1}{2} \omega_{g0} \frac{x}{l} = 0. \end{aligned}$$

Откуда

$$\left(\frac{x}{l}\right)_0 = \frac{\omega_{zб} - \frac{1}{8} \omega_{g0}}{\omega_{zб} + \omega_{нб} - \frac{1}{4} \omega_{g0}}, \quad (6)$$

где $\left(\frac{x}{l}\right)_0$ – расстояние от начала обработки (правого торца вала) до расположения лимитирующего (экстремального) сечения вала.

Без учета жесткости заготовки ($\omega_{g0} = 0$) из (6) получим известную зависимость [7]

$$\left(\frac{x}{l}\right)_0 = \frac{\omega_{zб}}{\omega_{zб} + \omega_{нб}}. \quad (7)$$

Из анализа зависимости (6) следует

$$\left. \begin{aligned} &\omega_{zб} - \frac{1}{8} \omega_{g0} > 0; \\ &\omega_{zб} + \omega_{нб} - \frac{1}{4} \omega_{g0} > 0; \\ &\omega_{zб} - \frac{1}{8} \omega_{g0} < \omega_{zб} + \omega_{нб} - \frac{1}{4} \omega_{g0}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Решение этих неравенств дает зависимости

$$\left. \begin{aligned} &\omega_{g0} < 8\omega_{zб}; \\ &\omega_{g0} < 4(\omega_{zб} + \omega_{нб}); \\ &\omega_{g0} < 8\omega_{нб}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Поскольку $\omega_{zб} \geq \omega_{нб}$, то из всех представленных неравенств для жестких валов, т. е. валов, имеющих упругую ли-

нию с одним экстремальным значением, необходимо выполнение условия

$$\omega_{g0} < 8\omega_{нб},$$

из которого, с учетом (3), получаем

$$\left(\frac{l}{d}\right)_p < 13,38 \cdot \sqrt[3]{d\omega_{нб}}, \quad (10)$$

где $\left(\frac{l}{d}\right)_p$ – расчетная величина отношения для жесткого вала.

В табл. 1 приведены расчетные значения длин вала исходя из зависимости (10), при которых будут выполняться условия наличия только одного экстремума.

В табл. 1 приведены расчетные значения длин вала исходя из зависимости (10), при которых будут выполняться условия наличия только одного экстремума.

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

$d, \text{ мм}$	50	75	100	150	200
$\left(\frac{l}{d}\right)_p <$	8,95	10,26	11,29	12,92	14,22
$l, \text{ мм} <$	447	769	1129	1937	2843

Таким образом, для каждого диаметра вала существует определенная его длина, меньше которой имеет место наличие только одного экстремума упругой линии перемещений оси вала. И наоборот, каждой длине соответствует предельный минимальный диаметр вала, обеспечивающий наличие только одного экстремума упругой линии перемещений оси.

$$d_p > \left(\frac{l}{d}\right)_p^3 \frac{1}{2400\omega_{нб}}. \quad (11)$$

Расчеты свидетельствуют (табл. 2) об адекватности упрощенной зависимости (6), по сравнению с известной мето-

дикой [6], по определению расположения экстремума от правого торца вала. Так, расхождение экстремума от задней опоры вала не превышает 5 % (см. табл. 2), что вполне допустимо для вычисления максимальной погрешности обработки.

Существенную погрешность при обработке вносит неодинаковая податливость опор вала: шпинделя и задней бабки станка (рис. 2). Для жестких валов ($l/d \leq 1,0$) это приводит к корсетности (см. рис. 1, линию 0–1–3–4), которая достигает максимума при $\left(\frac{x}{l}\right)_3 = \left(\frac{x}{l}\right)_3$.

Табл. 2. Величина упругих перемещений при обработке валов призматическим резцом ($l = 1000$ мм; $\omega_{нб} = 0,06$ мкм/Н)

$d, \text{ мм}$	100	150	200
$\left(\frac{x}{l}\right)_3$	0,932	0,85	0,838
$\left(\frac{x}{l}\right)_3$ [6]	0,9	0,85	0,84
$\left(\frac{x}{l}\right)_0$ [7]	0,833		

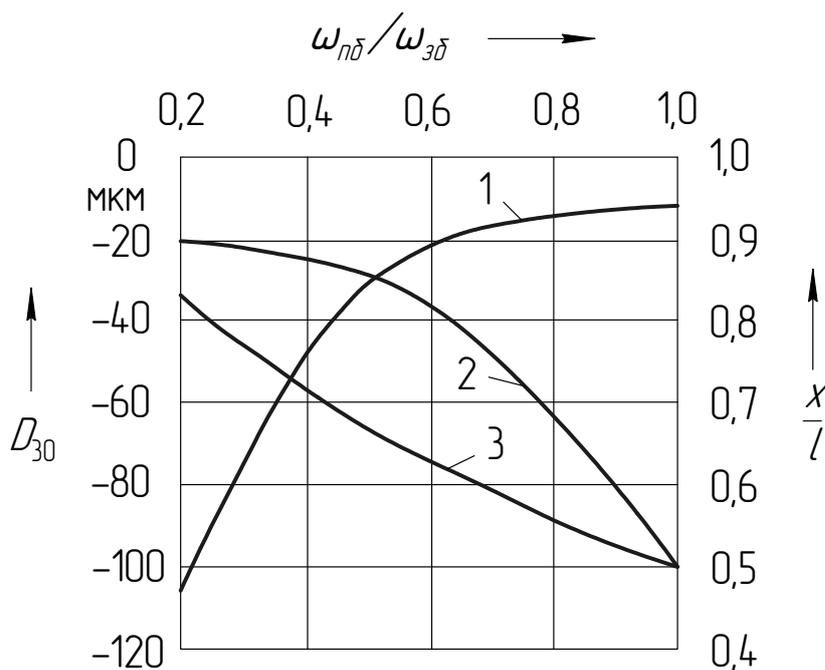


Рис. 2. Зависимость изменения максимальной погрешности ΔD_{30} (1) и расположения экстремальных точек (2, 3) на кривой упругих перемещений оси вала при обработке резцом от отношения $\omega_{n\delta} / \omega_{3\delta}$: 1 – ΔD_{30} , $f_0 \neq 0$; 2 – $\left(\frac{x}{l}\right)_3$; 3 – $\left(\frac{x}{l}\right)_0$ – без учета заготовки; $d = 100$ мм; $l = 1000$ мм; $\omega_{n\delta} = 0,06$ мкм/Н; $t = 0,5$ мм; $S = 0,5$ мм/об; $V = 200$ м/мин; $P_y = 211$ Н

Так, при исходных $\omega_{n\delta} = 0,06$ мкм/Н; $l = 1000$ мм; $d = 100$ мм; $E = 2 \cdot 10^7$ Н/см² и $P_y = 211$ Н получены данные погрешности $\Delta D_{30} = 2(y_3 - y_0)$, представленные на рис. 2.

Отметим значительную разницу в величинах $\left(\frac{x}{l}\right)_0$ и $\left(\frac{x}{l}\right)_3 = \left(\frac{x}{l}\right)_3$ (см. рис. 2), определяющих расположение

экстремальных сечений вала без и с учетом деформаций заготовки соответственно.

Таким образом, полученные зависимости позволяют упростить определение расположения лимитирующего сечения вала и, соответственно, максимальной погрешности обработки, в том числе и в производственных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маталин, А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Л. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Соколовский, А. П. Точность механической обработки и пути ее повышения / А. П. Соколовский. – М. : Машиностроение, 2012. – 304 с.
3. Корсаков, В. С. Точность механической обработки / В. С. Корсаков. – М. : Машиностроение, 1961. – 379 с.
4. Балакшин, Б. С. Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – М. : Машиностроение, 1959. – 559 с.

5. **Жолобов, А. А.** Прогнозирование и обеспечение качества технологических систем на этапах их проектирования и изготовления / А. А. Жолобов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 304 с.
6. 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.
7. **Шатуров, Г. Ф.** Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей / Г. Ф. Шатуров, Ж. А. Мрочек. – Минск : Технопринт, 2001. – 460 с.

Статья сдана в редакцию 30 сентября 2015 года

Денис Геннадьевич Шатуров, канд. техн. наук, инженер, Белорусско-Российский университет.

Виктория Владимировна Баранова, инженер.

Геннадий Филиппович Шатуров, профессор, Белорусско-Российский университет.

Denis Gennadyevich Shaturov, PhD (Engineering), engineer, Belarusian-Russian University.

Viktoriya Vladimirovna Baranova, engineer.

Gennady Filippovich Shaturov, Prof., Belarusian-Russian University.