О. И. Драчев, И. Ю. Амирджанова, Ф. С. Доблер, Р. П. Степанов

ВЛИЯНИЕ ОСЕВЫХ СИЛ ПОДЖАТИЯ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ

Тольяттинский государственный университет
E-mail: doi05@mail.ru

Проведен аналитический расчет величин коробления оси длинномерного вала от напряжений, созданных силой поджатия заднего центра станка заготовки. Даны рекомендации по уменьшению действия данного фактора на величину коробления вала. Материал может быть использован инженерно-техническими работниками предприятий.

Ключевые слова: осевые силы, остаточные напряжения, токарная обработка, прогиб вала.

O. I. Drachev, I. Yu. Amirdzhanova, F. S. Dobler, R. P. Stepanov

INFLUENCE OF AXIAL PRELOAD FORCES ON RESIDUAL STRESSES DURING TURNING

Tolyatti State University

An analytical calculation of the values of the warping of the axis of a long shaft from the stresses created by the preload force of the rear center of the workpiece machine is carried out. Recommendations are given to reduce the effect of this factor on the amount of warping of the shaft. The material can be used by engineering and technical employees of enterprises.

Keywords: axial forces, residual stresses, turning, shaft deflection.

Маложесткие длинномерные детали типа вала подвержены короблению после операций механической обработки, которое проявляется в прогибе оси вала.

Одной из причин прогиба вала после токарной обработки является действие внутренних напряжений, созданных поджатием заднего центра и последующим неравномерным съемом металла в процессе механической обработки.

Ось вала от предыдущей технологической операции (термообработки, правки и др.) имеет некоторую кривизну. При установке вала в центр обрабатывающего станка и поджатия его кривизна усиливается. При этом в поперечном сечении z вала возникают внутренние напряжения, созданные силой P поджатия и изгибающим моментом (рис. 1).

$$M_{изг} = Pe',$$

где e' – расстояние от изогнутой оси вала до линии центров станка в сечении z .

Определим величину прогиба вала δ оси от

усилия поджатия P заданным центром (рис. 1).

Экспериментально установлено, что ось длинномерного вала после операций термической стабилизации и механической обработки прогибается дугой, наиболее близко описываемой уравнением параболы второй степени

$$e = 4\delta_{\max}z(1 - z/l)/l, \quad (1)$$

где e – величина прогиба оси участка вала; $\delta_{\max}$ – максимальный прогиб вала; l – длина вала; z – текущая координата по длине.

При приложении усилия P вдоль оси центров максимальный прогиб δ вала будет наблюдаться посередине вала (рис. 1). Тогда δ определяется по методу Мора [2] приложением единичной силы в середине длины вала:

$$\delta = \int_0^l \frac{P_e M_1}{EJ} dz,$$

где M_1 – момент, создаваемый фиктивной единичной силой; E – модуль упругости материала; J – момент инерции. Тогда:

$$\delta = 5\delta_{\max}l^2 P/48EJ. \quad (2)$$

Рис. 1. Схема определения прогиба вала от внутренних напряжений, созданных поджатием в центрах

С учетом $J = \pi R^4/4$ уравнение (2) преобразуем к виду

$$\delta = 5\delta_{\max} K_0^2 P / 3\pi E R^2,$$

где K_0 – отношение длины вала к его диаметру.

Тогда расстояние в сечении от оси вала z , нагруженного усилием P , до линии центров определяется как

$$e' = \frac{4\delta_{\max}}{l} \left(1 + \frac{5K_0^2 P}{3\pi E R^2} \right) z(1 - r/l)$$

Соответственно изгибающий момент в сечении z от усилия P определяется по формуле:

$$M_{изг} = \frac{4P\delta_{\max}}{l} \left(1 + \frac{5K_0^2 P}{3\pi E R^2} \right) (z - z^2/l).$$

Определим параметры зависимости внутренних напряжений, образованных моментом $M_{изг}$ в сечении z по глубине вала. В координатах $x_1 O_1 \sigma_1$ (рис. 1), где O_1 – центр сечения z , а ось $O_1 x_1$ лежит в плоскости наибольшего изгиба вала и направлена по нормали к его изогнутой оси. Тогда проекция эпюры внутренних напряжений на плоскость $x_1 O_1 \sigma_1$ выразится уравнением

$$\sigma = ax_1, \quad (3)$$

где a – тангенс угла наклона проекции эпюры внутренних напряжений на плоскость $x_1 O_1 \sigma_1$.

Элементарный реактивный момент в сечении z от образовавшихся напряжений определяем по формуле:

$$dM_p = 2ax_1^2 \sqrt{R^2 - x_1^2} dx_1. \quad (4)$$

Тогда:

$$M_p = \int_{-R}^{+R} 2ax_1^2 \sqrt{R^2 - x_1^2} dx_1 = -2\pi R^2 a. \quad (5)$$

Так как реактивный момент M_p в сечении z равен изгибающему моменту $M_{изг}$ с обратным знаком, то, приравняв правые части выражений (3) и (5), найдем величину:

$$a = \frac{2P\delta_{\max}}{\pi R^2 l} \left(1 + \frac{5K_0^2 P}{3\pi E R^2} \right) (z - z^2/l). \quad (6)$$

После снятия, в результате механической обработки, слоя глубиной t_p (рис. 1) в сечении z относительно центра нового уменьшенного сечения образуется изгибающий момент $M(z)$ от внутренних напряжений, созданных силой P . В координатах $x_1 O_2 \sigma_2$ (рис. 1), где O_2 – центр сечения вала z после механической обработки, проекция на плоскость $x_1 O_2 \sigma_2$ эпюры внутренних напряжений выразится уравнением $\sigma = ax_1 + b$.

Тогда аналогично определению реактивного момента M_p в сечении z до съема металла (зависимости (3)–(5)) получим:

$$M(z) = \int_{-(R-t_p)}^{-(R-t_p)} 2(ax_1 + b)x_1 \sqrt{(R-t_p)^2 - x_1^2} dx_1$$

или после интегрирования с учетом уравнения (6):

$$M(z) = \frac{4P\delta_{\max}(R-t_p)^2}{R^2 l} \left(1 + \frac{5K_0^2 P}{3\pi E R^2} \right) (z - z^2/l).$$

Зная значение изгибающего момента $M(z)$ в сечении после съема металла, с помощью метода Мора найдем максимальный прогиб вала от внутренних напряжений, образованных

вследствие поджатия его усилием P заднего центра и последующего съема металла:

$$\delta''_{\max} = -\frac{5K_0^2 P \delta_{\max}}{3\pi E(R-t_p)^2} \left(1 + \frac{5K_0^2 P}{3\pi E R^2}\right). \quad (7)$$

Зависимость прогиба $\delta''_{\max}$ вала $\varnothing 40$ мм и длиной 2400 мм от параметров при усилии поджатия 10 кг, глубине резания 1,5 мм и начальном прогибе 0,5 мм показана на рис. 2. Анализ зависимости (7) показывает, что прогиб вала от внутренних напряжений, образованных усилием поджатия заднего центра, направлен в сторону, противоположную прогибу его на предыдущей операции.

Прогиб вала $\delta''_{\max}$ пропорционален квадрату отношения его длины к диаметру.

Рис. 2. Графики зависимости прогиба вала вследствие внутренних напряжений, образованных поджатием в центрах, от K_0 (—); $\delta_{\max}$ (---); R (· · ·); t_p (— · —); P (— × —)

С уменьшением прогиба вала на предыдущей операции $\delta''_{\max}$ и глубины резания t_p , а также увеличением радиуса R вала прогиб $\delta''_{\max}$ уменьшается. Причем при уменьшении прогиба на предыдущей операции до нуля прогиб $\delta''_{\max}$ также уменьшается до нуля.

Следовательно, для уменьшения прогиба длинномерного вала от внутренних напряжений, образованных усилием поджатия заднего центра, необходимо снижать усилие P до минимума; при обработке длинномерных валов производить задним центром только «касание» без дальнейшего поджима центровочного отверстия на торце вала до момента начала его вращения; стремиться к уменьшению прогиба вала на предыдущей операции (применять операции правки); выполнять точение длинномерного вала с малыми глубинами в несколько проходов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобровский, А. В. Технология вибрационного сверления глубоких отверстий / А. В. Бобровский, О. И. Драчев, И. Ю. Амирджанова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 1 (236) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 8.
2. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. Г. Яковлев, В. В. Матвеев. – К.: Наук. думка, 1995. – 703 с.
3. Бобровский, А. В. Установка для механической обработки тонкостенных осесимметричных деталей / А. В. Бобровский, О. И. Драчев, И. Ю. Амирджанова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (238) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 13.
4. Бобровский, А. В. Анализ характеристик работы установок для двухлезвийной обработки валов / А. В. Бобровский, О. И. Драчев, И. Ю. Амирджанова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (243) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 24.
5. Бобровский, А. В. Технология механической обработки осесимметричных деталей при автоматическом управлении процесса с учетом внешних случайных воздействий / А. В. Бобровский, О. И. Драчев, И. Ю. Амирджанова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (243) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 26.