

Определение деформаций технологической системы при обработке деталей переменного по длине профиля

Пегашкин В. Ф., докт. техн. наук
Старостин А. П.
НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

Рассмотрено моделирование процедур формирования параметров качества при механической обработке деталей на металлорежущих станках. В нежестких технологических системах изменение упругих деформаций системы по длине вызывает значительные отклонения формы обработанной поверхности. Деформация технологической системы при базировании детали постоянного по длине профиля определяется по известным зависимостям, в которые момент инерции детали входит как постоянная величина. Для вала переменного по длине профиля момент инерции изменяется по длине – по координате приложения силы резания. Проведен анализ применения различных методов расчета деформации детали круглого сечения переменного профиля. Предложен метод расчета, основанный на методе замены ступенчатого вала на гладкий с произвольным диаметром и приложением дополнительных поперечных сил и крутящих моментов и интегрального уравнения изогнутой оси балки. Показано, что наиболее близкие к действительности результаты при обработке вала в центрах дают расчеты предложенным методом, который в отличие от определения деформации решением дифференциального уравнения изогнутой оси балки третий метод универсален. При этом погрешность расчета не превышает 10 %.

Ключевые слова: деформация при обработке, переменный профиль, технологическая система.

Технология механической обработки деталей наряду с обычными приемами включает приемы и способы достижения заданного уровня качества, основанные на управлении упругодеформированным состоянием заготовок в процессе их обработки, что особенно эффективно при обработке нежестких деталей. Управление упругим деформированием заготовок и оптимизация параметров этого процесса позволяют достичь заданный уровень качества при сохранении высокой производительности.

В нежестких технологических системах изменение упругих деформаций системы по длине вызывает значительные отклонения формы обработанной поверхности.

Деформация технологической системы (y) при базировании детали постоянного по длине профиля определяется по известной зависимости [1]

$$y = P_y \left[\frac{x^2(l-x)^2}{3EJ} + \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \omega_{ПБ} + \left(\frac{x}{l}\right)^2 \omega_{ЗБ} + \omega_C, \right] \quad (1)$$

где x – координата силы по длине детали от передней бабки; l – длина детали; J – момент инерции детали ($J = 0,048d^4$, d – диаметр детали); E – модуль упругости материала детали; $\omega_{ПБ}$, $\omega_{ЗБ}$, ω_C – податливости соответственно передней бабки, задней бабки и суппорта; μ – коэффициент динамичности.

В приведенной зависимости момент инерции детали входит как постоянная величина. Если же вал имеет переменный профиль, то и момент инерции изменяется по длине вала (рис. 1).

Следовательно, для определения отклонения формы вала от заданной чертежом в случае обработки вала переменного профиля необходимо определить методы расчета деформации технологической системы при переменном по длине вала моменте инерции. Возможно применение следующих методик.

Во-первых, можно заменить ступенчатый вал на гладкий с приведенным диаметром, который рассчитывается по формуле [2]

$$d_{\text{пр}} = \frac{\sum d_i l_i}{\sum l_i},$$

где d_i – диаметр i -й ступени вала, l_i – длина i -й ступени вала.

Далее на основании формулы (1) и приведенного диаметра рассчитывается деформация технологической системы.

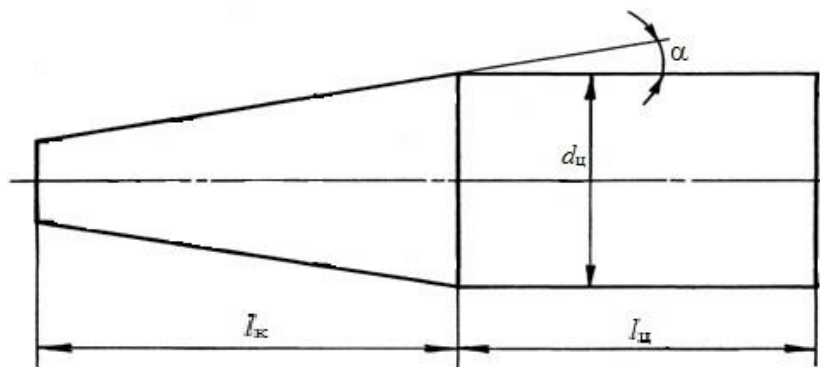


Рисунок 1. Типовая деталь

Во-вторых, возможно определить деформацию детали на основе дифференциального уравнения изогнутой оси балки [1]

$$EJ(x) \frac{d^2 y}{d^2 x} = M(x),$$

где E – модуль упругости материала детали, $J(x)$ – момент инерции поперечного сечения вала в функции длины, $M(x)$ – изгибающий момент, действующий на вал, в функции длины.

Задавая зависимости изменения момента инерции и изгибающего момента по длине детали, решая это уравнение, получим уравнение для определения деформации технологической системы. Так, например, для вала, состоящего из двух участков – цилиндрического и конического (рис. 1) уравнения имеют вид [3]:

для конического участка:

$$y(x) = -\frac{10}{3} \times \frac{Pd_o(d_o + 2l_t \text{tg}\alpha)}{IE(2\text{tg}\alpha)^4(d_o + 2x\text{tg}\alpha)} + 20 \frac{Pd_o(d_o + l_t \text{tg}\alpha)}{E(2\text{tg}\alpha)^4(d_o + 2x\text{tg}\alpha)} + 20 \frac{P}{IE(2\text{tg}\alpha)^4} \times \ln \frac{(d_o + 2x\text{tg}\alpha)}{2\text{tg}\alpha} + C_1 x + C_2,$$

для цилиндрического участка:

$$y(x) = \frac{10Px^3(2l-x)}{6IEd_u^4} + C_3x + C_4.$$

Постоянные интегрирования C_1, C_2, C_3, C_4 определяются из начальных условий и из условия равенства деформаций на стыке первого и второго участков.

Этот метод при расчете деформации технологической системы дает достоверные результаты, однако, недостатком метода является то, что для каждого нового профиля детали необходимо задавать функцию $J(x)$ и, следовательно, результирующие зависимости будут иметь другой вид в каждом конкретном случае. Кроме того, при базировании в патроне с поджимом задним центром значительно усложняется зависимость для определения $M(x)$.

В третьих, возможно применение другого метода. Для определения деформации технологической системы при обработке вала переменного по длине профиля преобразуем деталь в ступенчатый вал (рис. 2). В работах [4, 5] даны методики расчета деформации ступенчатых валов при базировании в центрах без учета деформации опор, т.е. в качестве расчетной схемы была принята установка балки на шарнирные жесткие опоры. Однако в производстве не менее распространенным является базирование вала в патроне с поджимом задним центром. В этом случае в качестве расчетной схемы принимается жесткая заделка с шарнирной опорой – статически неопределимая система.

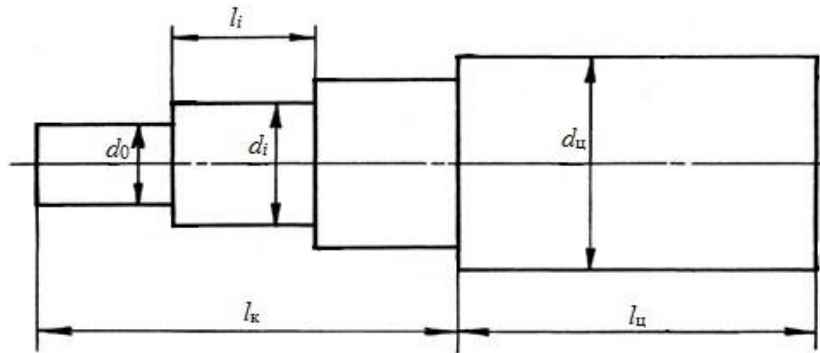


Рисунок 2. Преобразование вала (рис. 1) в ступенчатый

По методу Жемочкина Б.Н. [6] заменим ступенчатый вал на гладкий с произвольным диаметром d (рис. 3).

Для сохранения эквивалентности упругой линии исходного ступенчатого вала и упругой линии вновь полученного вала на последний накладываются дополнительные силы и моменты, а исходная нагрузка и реакции опор умножаются на коэффициенты приведения.

$$K_1 = \frac{J}{J_1}; \quad K_2 = \frac{J}{J_2}; \quad \dots \quad K_n = \frac{J}{J_n}; \quad K_i = \frac{J}{J_i},$$

Очевидно, что для рассматриваемого случая

$$\sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n M_{i,i+1}; \quad \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n Q_{i,i+1} \quad \sum_{i=1}^n q_i = 0.$$

Тогда

$$\begin{aligned} EJy_{\text{д}} = EJy_0 + EJ\phi_0 x + R_0 \sum_{i=1}^n (K_{i+1} - K_i) & \left[\frac{x_i(x-x_i)^2}{2} + \frac{(x-x_i)^3}{6} \right] + \\ + R_a \sum_{i=m}^{n-1} (K_{i+1} - K_i) \times & \left[\frac{(1-x_i)(x-x_i)^2}{2} + \frac{(x-x_i)^3}{6} \right] - \\ - R_b K_1 \frac{x^3}{6} - PK_m \frac{(x-x_i)^3}{6} - M_a \sum_{i=m}^{n-1} & (K_{i+1} - K_i) \frac{(x-x_i)^3}{6}. \end{aligned}$$

Деформация и угол поворота в начале координат определяются из начальных условий ($x=0$; $y_{\text{д}}=0$; $x=l$; $y_{\text{д}}=0$).

Отсюда угол поворота в начале координат

$$\begin{aligned} EJ\phi_0 = -\frac{1}{l} \left[R_b \sum_{i=1}^{m-1} (K_{i+1} - K_i) \left(\frac{l^3}{6} - \frac{lx_i^2}{2} + \frac{x_i^3}{3} \right) + R_a \sum_{i=m}^{n-1} (K_{i+1} - K_i) \frac{(l-x_i)^3}{3} - \right. \\ \left. - R_b K_1 \frac{l^3}{6} - PK_m \frac{(l-x_p)^3}{6} - M_a \sum_{i=m}^{n-1} (K_{i+1} - K_i) \frac{(l-x_i)^2}{2} \right] \end{aligned}$$

Реакции в опорах и момент в заделке можно определить, раскрывая статистическую неопределенность схемы базирования. Проводя преобразования, получим зависимость для определения деформации вала в точке приложения силы ($x = x_p$)

$$\begin{aligned} y_{\text{д}}(x_p) = -\frac{l^3}{3EJ} \left\{ \left(1 - \frac{x_p}{l} \right) R_b \left[\sum_{i=1}^{m-1} (K_i - K_{i+1}) \frac{x_i^3}{l^3} + \frac{3M_a}{2Rl_b^3} \times \right. \right. \\ \times \sum_{i=1}^{n-1} (x_i^2 - x_p l) (K_{i+1} - K_i) + K_m \frac{P}{R_b} \frac{x_p^2}{l^2} \left. \right] + \\ + R_a \frac{x_p}{l} \sum_{i=m}^{n-1} (K_{i+1} - K_i) \left(1 - \frac{x_i}{l} \right) \left. \right\}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} M_a = P \left[1 - \frac{(1-x_p)^2(2l+x_p)}{2l^3} - x_p \right] \\ R_a = P \left[1 - \frac{(1-x_p)^2(2l+x_p)}{2l^3} \right], \\ R_b = \frac{P(1-x_p)^2(2l+x_p)}{2l^3}. \end{aligned}$$

Учитывая, что $K_i = J/J_i$ и принимая для сплошного вала $y_i = 0,05d_i^4$, получим

$$y_D(x_P) = -\frac{l^3}{0,15E} \left\{ R_b \left(1 - \frac{x_P}{l}\right) \left[\sum_{i=1}^{m-1} \frac{x_i^3}{l^3} \left(\frac{1}{d_i^4} - \frac{1}{d_{i+1}^4} \right) + \frac{3M_a}{2R_b l^3} \sum_{i=1}^{n-1} (x_i^2 - x_P l) \cdot \left(\frac{1}{d_{i+1}^4} - \frac{1}{d_i^4} \right) + \frac{P}{R_b} \frac{x_P^2}{l^2 d_m^4} \right] + R_a \frac{x_P}{l} \sum_{m-1}^{n-1} \left(1 - \frac{x_i}{l}\right)^3 \left(\frac{1}{d_{i+1}^4} - \frac{1}{d_i^4} \right) \right\}.$$

Перемещение детали в расчетном сечении от деформации опор из несложных геометрических построений и преобразований можно определить как

$$y_c(x_P) = -\frac{P}{2l^4} \left[\frac{(l-x_P)^2(l-x_P)(2l+x_P)}{j_b} + x_P \frac{2l^3 - (l-x_P)^2(2l+x_P)}{j_a} \right].$$

Отсюда получим

$$y(x_P) = -\frac{Pl^3}{0,15E} \left\{ \left(1 - \frac{x_P}{l}\right) \left[\frac{(l-x_P)^2(2l+x_P)}{2l^3} \times \sum_{i=1}^{m-1} \frac{x_i^3}{l^3} \left(\frac{1}{d_i^4} - \frac{1}{d_{i+1}^4} \right) + \frac{3[2l^3 - (1-x_P)^2(2l+x_P) - 2l^2 x_P]}{4l^5} \times \sum_{i=1}^{m-1} (x_i^2 - x_P l) \left(\frac{1}{d_{i+1}^4} - \frac{1}{d_i^4} \right) + \frac{x_P^2}{l^2 d_m^4} \right] + \frac{2l^3 - (1-x_P)^2(2l+x_P)}{2l^4} x_P \times \sum_{m-1}^{n-1} \left(1 - \frac{x_i}{l}\right)^3 \left(\frac{1}{d_{i+1}^4} + \frac{1}{d_i^4} \right) \right\} - \frac{P}{2l^4} \left[\frac{(l-x_P)^2(l-x_P)(2l+x_P)}{j_b} + x_P \frac{2l^3 - (l-x_P)^2(2l+x_P)}{j_a} \right]. \quad (2)$$

Зависимость (2) дает возможность определить деформацию технологической системы при обработке деталей типа тел вращения любого профиля при установке в патроне с поджимом задним центром. На рис. 4 проведено сравнение различных методик расчета с экспериментальными данными.

Видно, что наиболее близкие к действительности результаты при обработке вала в центрах дают расчеты по первому и третьему методам. Однако в отличие от определения деформации решением дифференциального уравнения изогнутой оси балки третий метод универсален.

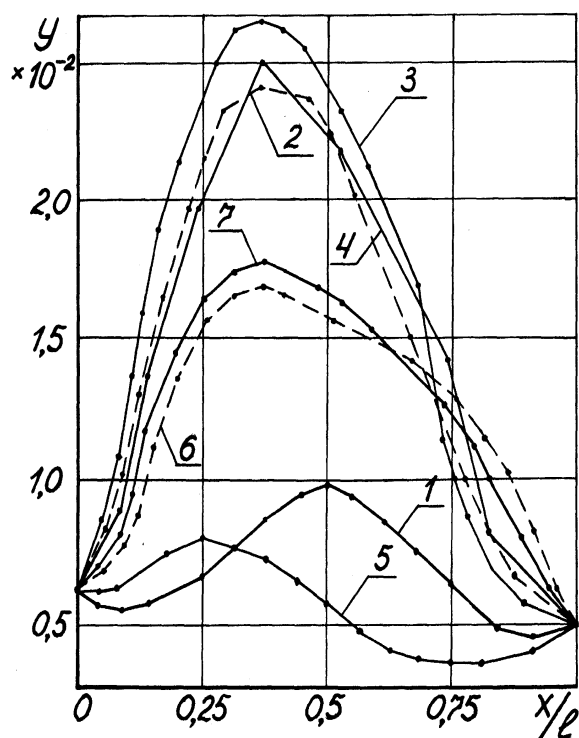


Рисунок 4. Деформация детали по длине, рассчитанные:
 1 – по методике [2] при базировании в центрах,
 2 – по формуле (2) при базировании в центрах,
 3 – по методике [4], 4 – практическая при базировании в центрах,
 5 – по методике [2] при базировании в патроне и заднем центре,
 6 – практическая при базировании в патроне и заднем центре,
 7 – по формуле (2) при базировании в патроне и заднем центре

Библиографический список

1. Беляев Н. М. Сопrotивление материалов. – М. : Наука, 1976. – 547 с.
2. Балакшин Б. С. Основы технологии машиностроения. – М. : Машиностроение, 1969. – 559.
3. Пегашкин В. Ф. Динамические деформации технологической системы при токарной обработке детали типа «вал» малой жесткости / В.Ф. Пегашкин, А.Б. Лысых // Уральский гос. технический университет.- 1988.- Деп. в М:ЦНИИ МАШ. N ДР-392. 1983.
4. Васильевых Л. А. Универсальная зависимость для определения прогибов ступенчатых валов / Л. А. Васильевых и др. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1975. – № 5. – с. 67–69.
5. Васильевых Л. А. Определение прогибов ступенчатых валов / Л.А. Васильевых и др. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1976. – № 11. – с. 73–75.
6. Пономарев С. Д. Расчеты на прочность в машиностроении. – М. : Машгиз, 1956. – 136 с.