

**Зависимость глубины резания от погрешности формы поперечного сечения при комбинированной обработке нежестких деталей типа полый цилиндр**

д.т.н. проф. Максимов Ю.В., к.т.н. доц. Анкин А.В., Ветрова Е.А.  
МГТУ «МАМИ»

Проведенные исследования [1-3] показали, что комбинированная обработка нежестких деталей типа полый цилиндр резанием и поверхностным пластическим деформированием дает выигрыш в производительности, высокие показатели по точности обработки (8 - 9 качество) и шероховатости обработанной поверхности ( $R_a = 0.08...0.32 \text{ мкм}$ ).

Однако форма заготовки может иметь погрешности как в продольном, так и в поперечном сечении, что обусловлено погрешностями обработки на предыдущих заготовительных операциях. Данные погрешности оказывают негативное влияние на точность комбинированной обработки нежестких деталей типа полый цилиндр, поскольку вызывают изменение глубины резания, в результате чего изменяется сила резания.

Рассмотрим, как глубина резания зависит от погрешности формы заготовки в поперечном сечении.

Поскольку под воздействием перерезывающей силы в процессе обработки происходит деформация поперечного сечения заготовки, то данное поперечное сечение является не кольцом в некоторой точке с координатой  $X$  по длине, а двумя эллипсами с малым эксцентриситетом  $\varepsilon (x \ll 1)$ , как представлено на рис. 1.

На данном рисунке изображено сечение заготовки с уже имеющимися погрешностями в поперечном сечении - эксцентриситетом и разнотолщинностью, являющейся следствием отклонения от концентричности. Полуоси наружного эллипса -  $a_1$  и  $b_1$  ( $a_1 > b_1$ ). Полуоси внутреннего эллипса -  $a_2$  и  $b_2$  ( $a_2 > b_2$ ).  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  - толщина стенок заготовки, причем  $\sigma_2 - \sigma_1 = T$ , где:  $T$  - величина допуска на толщину стенки;  $O_1$  - ось наружного эллипса - ось обрабатываемой детали;  $O_2$  - ось внутреннего эллипса - прием совпадающей с линией центров станка;  $\theta$  - угол поворота сечения. Поскольку базирование рассматриваемой детали происходит по наружной поверхности и обработка ведется тоже по наружной поверхности, то погрешность разнотолщинности  $\sigma_{1,2}$  не оказывает влияния на изменение глубины резания, а влияет лишь на колебания поперечного сечения детали в процессе обработки.

Примем  $h_0$  - глубина резания, которая устанавливается по максимальному удалению обрабатываемой поверхности от ее центра. В данном случае реальная глубина резания в продольных точках  $M_1$  и  $M_2$  наружного эллипса будет определяться выражением:

$$h_1 = h_0 - \left( \frac{a_1}{2} - \rho \right), \quad (1)$$

где  $\rho_{1,2} = \rho$  - расстояние от центра  $O_2$  линии центров станка до точек  $M_{1,2}$  наружного эллипса (см. рис. 1).

Каноническое уравнение эллипса имеет следующий вид:

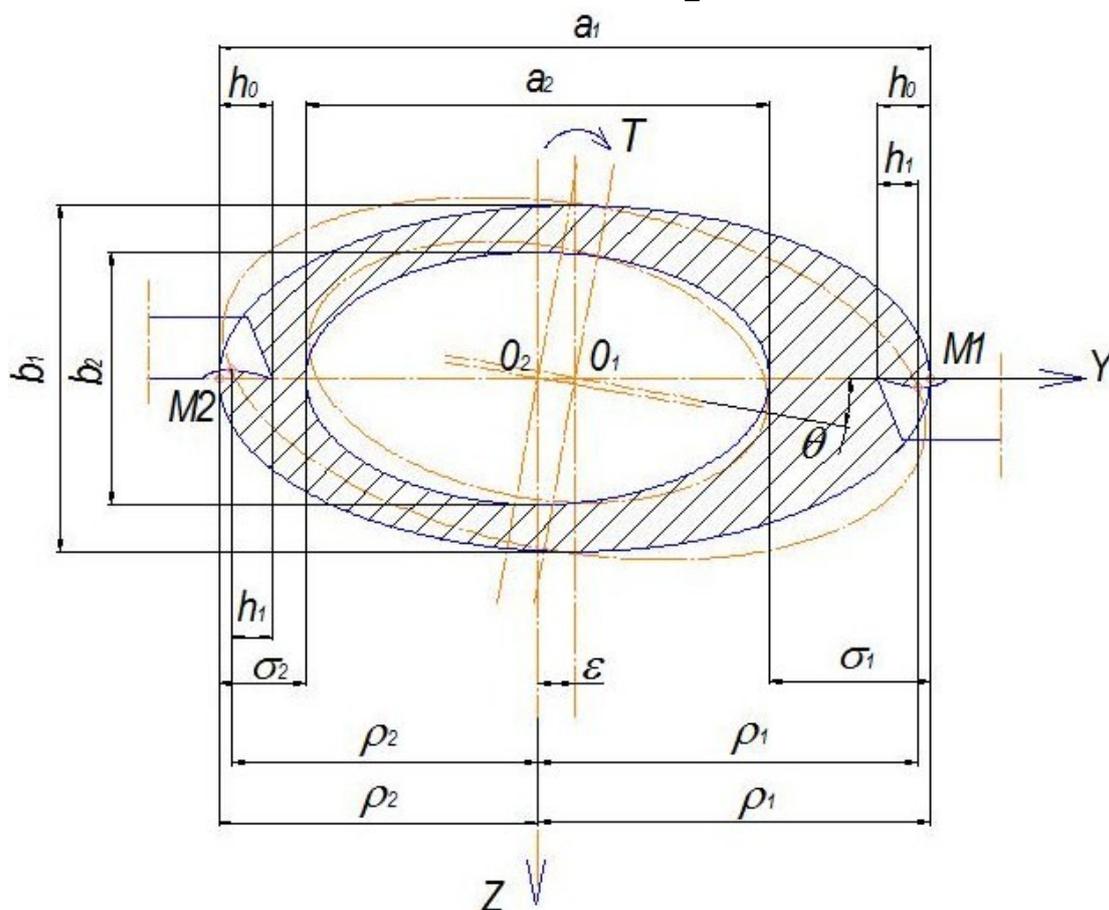
$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (2)$$

Выражение для эксцентриситета имеет вид:

$$\varepsilon = 1 - \frac{b^2}{a^2}. \quad (3)$$

При переходе к полярным координатам  $z = a \cdot \cos \theta$  находим, что:

$$\rho = \sqrt{y^2 + z^2} = a\sqrt{1 - \varepsilon \cdot \sin^2 \theta} \approx a - \frac{\varepsilon \cdot a}{2} \sin^2 \theta. \quad (4)$$



**Рис. 1. Схема изменения глубины резания резцами блока устройства для комбинированной обработки при начальных погрешностях заготовки в поперечном сечении**

В нашем случае выражение для  $\rho$  будет иметь следующий вид:

$$\rho = \sqrt{y^2 + z^2} = a_1\sqrt{1 - \varepsilon \cdot \sin^2 \theta} \approx a_1 - \frac{\varepsilon \cdot a_1}{2} \sin^2 \theta. \quad (5)$$

И окончательно:

$$\rho = a_1 - \frac{\varepsilon \cdot a_1}{2} \sin^2 \omega t = a_1 \left( 1 - \frac{\varepsilon \cdot \sin^2 \omega t}{2} \right), \quad (7)$$

где  $\omega$  - угловая скорость вращения заготовки,  
 $t$  - время.

Таким образом, в сечении X глубина резания  $h_1(x)$ , обусловленная наличием указанных выше погрешностей заготовки в поперечном сечении, будет определяться выражением:

$$\begin{aligned} h_1 &= h_0 - \left( \frac{a_1}{2} - \rho \right) \approx h_0 - \frac{a_1}{2} + \rho \approx h_0 - \frac{a_1}{2} + a_1 - \frac{\varepsilon \cdot a_1}{2} \sin^2 \omega t \approx h_0 + \frac{a_1}{2} - \frac{\varepsilon \cdot a_1}{2} \sin^2 \omega t \approx \\ &\approx h_0 + \frac{a_1}{2} (1 - \varepsilon \cdot \sin^2 \omega t). \end{aligned} \quad (8)$$

Изменение глубины резания происходит также вследствие изогнутости оси обрабаты-

ваемого нежесткого полого цилиндра, вызванной изгибными колебаниями, причем изменение глубины резания на резцах равно по величине и противоположно по знаку, а также вследствие деформации поперечного сечения детали под воздействием перерезывающей силы. Обрабатываемая деталь вращается с угловой скоростью  $\omega$ , ось детали, как указано выше, отклонена от оси ОХ в сечении Х на величину поперечного перемещения, вызванного поперечными или изгибными колебаниями – величину прогиба, которую обозначим как  $\varpi(x, t)$ .

Пусть первоначальная (исходная) деформация поперечного сечения детали под воздействием перерезывающей силы будет обозначена  $b_0$  (мм), тогда величина деформации поперечного сечения  $b(x, t)$  детали, вращающейся со скоростью  $\omega$ , может быть описана следующим выражением:

$$b(x, t) = b_0 \cdot \cos(\omega t + \alpha) \cdot \delta(x - l), \quad (9)$$

где:  $\alpha$  - начальный угол поворота поперечного сечения нежесткой детали типа полый цилиндр,

$\delta(x)$  - дельта-функция по координате.

Рассмотрим первоначальную деформацию поперечного сечения детали под воздействием перерезывающей силы -  $b_0$ . В начальный момент времени  $t_0$  в точке  $x_0$  имеют место лишь собственные свободные колебания поперечного сечения детали.

Граничные условия в начальный момент времени запишем в виде:

$$\begin{aligned} b_0(0; 0) &= 0 \\ b_0(0; 0) &= b_{MAX} \end{aligned} \quad (10)$$

Величину  $b_{MAX}$  можно найти из задачи свободных колебаний поперечного сечения [4].

Примем допущения, что круговое кольцо имеет постоянное поперечное сечение: на рисунке 2 изображена средняя линия поперечного сечения детали, размеры поперечных сечений данного кольца малы в сравнении с радиусом осевой окружности – и что каждое поперечное сечение имеет ось симметрии, расположенную в плоскости кольца.

Рассмотрим радиальные колебания поперечного сечения детали. В этом случае осевая линия кольца представляет окружность с периодически изменяющимся радиусом (рис. 2), и все поперечные сечения движутся в радиальных направлениях без поворотов.

На рис. 2 приняты следующие обозначения:  $R(t)$  - радиус осевой линии недеформированного кольца,  $U(t)$  - радиальное перемещение, принятое положительным по направлению к центру и одинаковое для всех поперечных сечений,  $A$  - площадь поперечного сечения кольца.  $a_1(t)$  - деформация кольца по оси Y,  $a_2(t)$  - деформация кольца по оси X. Относительное удлинение кольца в окружном направлении, т.е. искомую величину обозначим как  $b_{MAX} = \frac{U(t)}{R(t)}$ .

Потенциальная энергия деформации, состоящая в нашем случае из энергии простого растяжения, определяется выражением [4]:

$$V = \frac{AEU^2}{2R^2} \cdot 2\pi R, \quad (11)$$

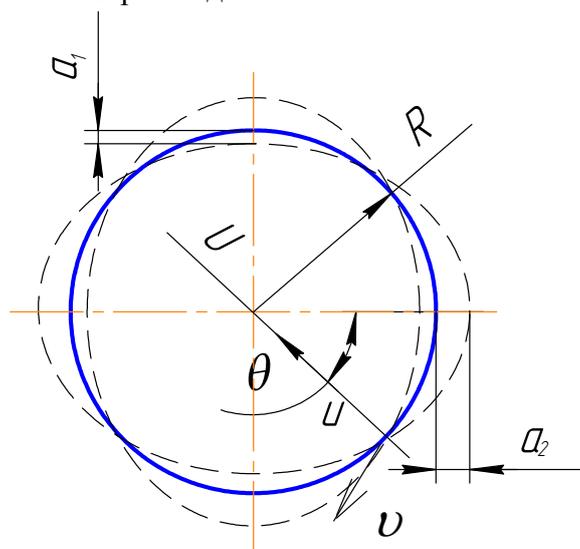
где:  $E$  - модуль упругости материала детали.

Кинетическая энергия колебаний равна:

$$T = \frac{A\gamma}{2g} \cdot \dot{U}^2 \cdot 2\pi R, \quad (12)$$

где:  $g$  - ускорение силы тяжести;

$\gamma$  - вес единицы объема материала детали.



**Рис. 2. Колебания кругового кольца**

Из выражений (11) и (12) получаем:

$$\ddot{U} + \frac{Eg}{\gamma} \cdot \frac{1}{R^2} \cdot U = 0. \quad (13)$$

Откуда далее можно получить гармоническое движение (колебательное) движение кольца:

$$U = C_1 \cdot \cos pt + C_2 \cdot \sin pt, \quad (14)$$

где:  $p = \sqrt{\frac{Eg}{\gamma R^2}}$ ;

$C_1, C_2$  - произвольные постоянные интегрирования, для определения которых нужно рассмотреть начальные условия. В начальный момент времени  $t = 0$ .

Подставим  $t = 0$  в выражение (14), откуда получим:

$$C_1 = U. \quad (15)$$

Далее продифференцируем выражение (14) по времени и подставим  $t = 0$  в выражение производной, получаем:

$$C_2 = \frac{\dot{U}}{p}. \quad (16)$$

Подставив численные значения, мы по приведенному выше алгоритму можем рассчитать деформацию поперечного сечения нежестких деталей типа полый цилиндр под воздействием перерезывающей силы.

Итак, изменение глубины резания, вызванное изогнутостью оси обрабатываемой детали, т.е. изгибными колебаниями, а также деформацией поперечного сечения детали, можно описать следующим выражением:

$$h_2(x, t) = \varpi(x, t) + b_0 \cdot \cos(\omega t + \alpha) \cdot \delta(x - l). \quad (17)$$

Таким образом, просуммировав указанные выше изменения глубины резания, можно получить выражение, по которому будет определяться реальная глубина резания в текущей точке:

$$h(x,t) = h_0 + \frac{e_{3II}}{l_2} \left( l_2 - \frac{S_0 \cdot n}{60} t \right) + \left[ \frac{e_{ДЗ} - e_{ДП}}{l_2} \left( l_2 - \frac{S_0 \cdot n}{60} t \right) + e_{ДП} \right] \cdot \cos \frac{2\pi n}{60} t +$$

$$+ \varpi(x,t) - a_1 \frac{\varepsilon(x)}{2} \sin^2 \frac{2\pi n}{60} t + b_0 \cdot \cos(\omega t + \alpha) \cdot \delta(x-l) - \Phi,$$
(18)

где:  $n$  – частота вращения заготовки;

$\Phi$  - величина упругого восстановления материала детали после процесса обработки резанием. Данная величина ничтожно мала, поэтому ее можно не учитывать при расчетах.

### Выводы

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что глубина резания в процессе обработки зависит от погрешностей геометрии поперечного сечения нежестких деталей типа полый цилиндр. При изменении глубины резания изменяется и сила резания, что негативным образом влияет на параметры точности комбинированной обработки деталей.

### Литература

1. Анкин А.В. Повышение производительности и качества комбинированной обработки нежестких валов. Дисс. ... к.т.н., - М., МАМИ, 1993.
2. Максимов Ю.В. Обеспечение качества и производительности обработки нежестких валов применением технологических систем с дополнительными контурами связи. Дисс. ... д.т.н., - М., МГТУ «МАМИ», 1999.
3. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. - М.: Машиностроение, 1978.- 152 с.
4. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле.- Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1967.- 444 с.

### Параметры резания при иглофрезеровании

д.т.н. проф. Вороненко В.П., к.т.н. Седых М.И.  
МГТУ «Станкин»

В машиностроительном производстве используются такие технологические операции, как волочение, антикоррозионное покрытие металла, сварка взрывом. Перед выполнением этих операций необходимо предварительно подготовить обрабатываемую поверхность, т.е. удалить окалину, ржавчину, окислы, старую краску, грубые загрязнения, продукты обугливания, остатки песка и шлака. Многочисленные методы подготовки поверхности под выполнение этих операций можно разделить на механические и химические. К химическим методам относятся травление серной или соляной кислотой. К механическим относятся такие, как обработка щётками, шарошками, абразивными кругами, дробеструйная и т.д. Наиболее перспективным методом очистки металла за простоту, дешевизну и экологичность по отношению к перечисленным методам считается иглофрезерование.

В качестве инструмента при иглофрезеровании используется иглофреза – режущий инструмент с несколькими сотнями тысяч режущих элементов, собранный в виде тела вращения из прямых и равных по длине отрезков высокоуглеродистой стальной проволоки – игл с твердостью НВ 500, с плотностью упаковки на рабочей поверхности 65...85%. Каждая проволока (игла) представляет собой микрорезец с отрицательным передним углом резания –  $\gamma$ . Обязательным условием работоспособности инструмента является упругость каждой иглы и всей совокупности игл, участвующих в контакте с обрабатываемым материалом. Процесс осуществляется при вращении режущего инструмента, который, будучи прижатым к поверхности движущегося изделия (либо двигаясь сам), обрабатывает последнее рис. 1.

Основными показателями, характеризующими процесс иглофрезерования, являются:

- скорость резания;