

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ
УГЛОВОГО ШАГА РАЗВЁРТКИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СХЕМЕ РЕЗАНИЯ
КОМБИНИРОВАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ЗЕНКЕР-РАЗВЁРТКА**

Мирошниченко А.В.
(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Введение

При обработке осевым многозубым инструментом наиболее характерным отклонением от круглости является огранка отверстий.

Наличие огранки отверстий оказывает большое влияние на эксплуатационные свойства узла или машины в целом. Контакт сопряжённых поверхностей деталей машин происходит по вершинам микронеровностей наиболее выступающих мест контактирующих поверхностей. Отношение фактической поверхности контакта к номинальной при чистовом развёртывании составляет 0,3 – 0,5. Такой характер контакта приводит к интенсивному износу, а также увеличивает зазоры между сопряжёнными поверхностями. Рабочие зазоры высокоточных элементов гидроаппаратуры должны составлять 0,003-0,015 мм, так как только в этом случае обеспечивается надёжная её работа. Поэтому величина огранки золотниковой пары (цилиндра и плунжера) должна находиться в пределах 0,001 – 0,01 мм.

Причиной образования огранки отверстий являются вынужденные колебания или неуравновешенные радиальные силы [1, 2]. Нетрудно заметить, что неуравновешенная радиальная сила при образовании огранки должна изменяться по периодическому закону.

Относительно методов устранения вынужденных колебаний существует ряд различных точек зрения, но, как показали исследования, одновременное устранение всех источников, порождающих эти колебания, является невозможным. Авторы работ [3, 4, 5, 6] рекомендуют изготавливать развёртки с неравномерным распределением зубьев с целью гашения вибраций. Однако на данный момент не существует математических моделей для определения величины огранки при работе комбинированного инструмента (КИ) с неравномерным распределением зубьев по параллельной схеме резания, а все существующие модели адекватны только для последовательной схемы резания.

Целью данной работы является исследование процесса образования огранки при параллельной схеме резания КИ зенкер-развёртка с неравномерным распределением зубьев чистовой ступени. При этом величина минимально-допустимого отклонения угловых шагов развёртки определяется зависимостью

$$\Delta\Theta_{\min} = \frac{360^{\circ}}{Z_p^2},$$

где Z_p – число зубьев развёртки.

Основная часть

Работа КИ зенкер-развёртка по параллельной схеме резания характеризуется тем, что частота колебаний каждой ступени будет определяться числом зубьев. Так как число зубьев на каждой ступени будет различаться, то траектория движения центра будет представлять фигуру Лиссажу высокого порядка.

Уравнение движения траектории центра можно представить следующей зависимостью [7]

$$\begin{aligned} v_o &= -A \cdot \sin(m \cdot \omega_0 \cdot t + \delta); \\ \xi_o &= -A \cdot \sin(n \cdot \omega_0 \cdot t), \end{aligned} \quad (1)$$

где m и n – коэффициенты, определяющие соотношение частот по координатам;

A – амплитуда радиальных колебаний центра инструмента;

δ – угол фазового сдвига.

Уравнение движения зубьев второй ступени КИ при различных частотах колебаний, направленных по координатам $vO_{II}\xi$ (рис. 2) в параметрическом виде выглядит так:

$$\begin{aligned} v &= R_p \cdot \cos(\omega \cdot t + \Theta_p) - A \cdot \sin(m \cdot \omega_0 \cdot t + \delta); \\ \xi &= R_p \cdot \sin(\omega \cdot t + \Theta_p) - A \cdot \sin(n \cdot \omega_0 \cdot t), \end{aligned} \quad (2)$$

где ω – круговая частота вращения зубьев инструмента; ω_0 – круговая частота вращения

центра инструмента; Θ_p – угловой шаг между зубьями развёртки; R_p – радиус развёртки; t – время, с.

При обосновании схемы распределения зубьев КИ, работающего по параллельной схеме резания, количество воздействующих параметров определяется ступенями, обрабатываемыми отверстия одинаковой длины. В противном случае система будет работать по комбинированной схеме резания.

Одинаковую длину обработки имеют не более двух ступеней. Решение задачи, когда на систему воздействует более двух параметров в принципе возможно, однако является достаточно громоздким и не имеет практического значения.

При разработке математической модели образования огранки комбинированным инструментом зенкер-развёртка, работающего по параллельной схеме резания, приняты следующие допущения

Рис. 2. Траектория движения зубьев второй ступени и центра КИ зенкер-развёртка при параллельной схеме резания

(см. рис. 2):

- 1) зенкер определяет частоту колебаний по координате v ;
- 2) развёртка определяет частоту колебаний по координате ξ ;
- 3) угол фазового сдвига между колебаниями по обеим координатам зависит от угла смещения между первыми зубьями на каждой ступени. На первом этапе исследований угол фазового сдвига принят равным 0;
- 4) период колебаний центра инструмента определяется временем поворота второй ступени на угловой шаг;
- 5) инструмент закреплён в плавающем патроне.

Частоты колебаний координатам ν и ξ с учётом первых двух допущений, принятых выше, будут определяться числом зубьев на каждой ступени КИ зенкер-развёртка. Следовательно $m = Z_3$, а $n = Z_P$. Тогда формулу (1) удобнее представить в следующем виде

$$\begin{aligned} \nu_o &= -A \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \delta); \\ \xi_o &= -A \cdot \sin\left(\frac{Z_P}{Z_3} \cdot \omega_0 \cdot t\right). \end{aligned} \quad (3)$$

где Z_3 – число зубьев зенкера.

Рассмотрим формирование поперечного сечения отверстия при неравномерном распределении зубьев развёртки (второй ступени КИ). Так как формирование поперечного сечения отверстия осуществляется за пол оборота, то, изменяя время от 0 до $T/2$ в уравнении (2) получим форму поперечного сечения отверстия (рис. 3), образованного зубьями КИ за один колебательный цикл, т.е. когда центр опишет замкнутую фигуру.

Величина огранки определяется по формуле (см. рис. 3)

$$\Delta_{огр} = R_{max} - R_{min}, \quad (4)$$

где $R_{min} = \rho_{A(1-Z/2)}$ при $\Delta\Theta < \Delta\Theta_{min}$; $R_{min} = \rho_{C(1-Z/2)}$ при $\Delta\Theta \geq \Delta\Theta_{min}$.

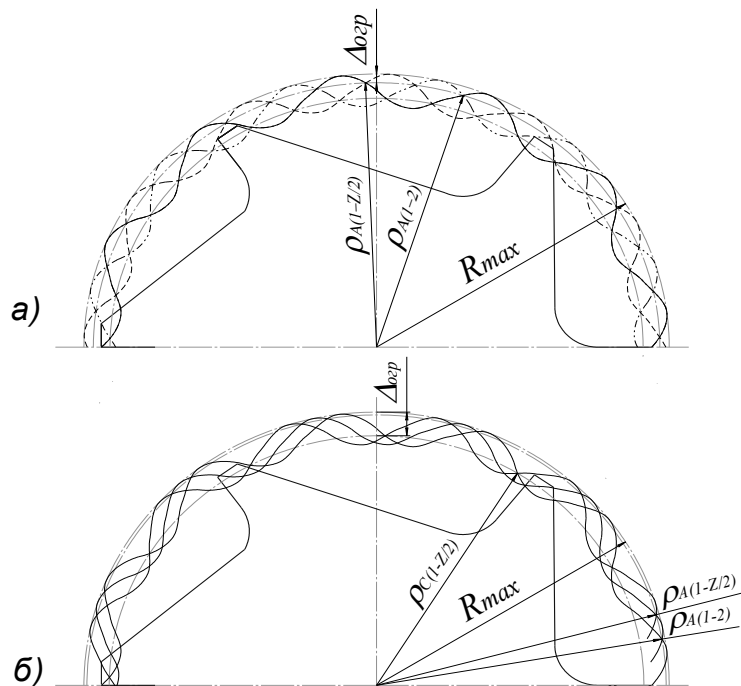


Рис. 3. Траектории движения вершин зубьев второй ступени КИ зенкер-развёртка при параллельной схеме резания:

- а) $\Delta\Theta < \Delta\Theta_{min}$, $Z_3 = 3$, $Z_P = 6$;
- б) $\Delta\Theta \geq \Delta\Theta_{min}$, $Z_3 = 3$, $Z_P = 6$

Радиус вектор, определяющий траекторию движения первой пары зубьев развёртки, определится зависимостью

$$\begin{aligned} \rho = \sqrt{R_P^2 - 2A \cdot R_P \cdot \left(\sin(\omega_0 \cdot t) \cdot \cos\left(\frac{\omega_0}{Z_P} \cdot t\right) + \sin\left(\frac{Z_P}{Z_3} \cdot \omega_0 \cdot t\right) \cdot \sin\left(\frac{\omega_0}{Z_P} \cdot t\right) \right)} + \\ \sqrt{+ A^2 \cdot \left(\sin^2(\omega_0 \cdot t) + \sin^2\left(\frac{Z_P}{Z_3} \cdot \omega_0 \cdot t\right) \right)} \end{aligned} \quad (5)$$

Траектория, описываемая второй парой зубьев, смещена относительно траектории, описываемой первой парой зубьев на угол начальной фазы $\delta = Z_P \cdot \Delta\Theta$ [8].

Тогда уравнение траектории, описываемой центром второй пары зубьев, будет иметь вид

$$\begin{aligned} v_o &= -A \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + Z_P \cdot \Delta\Theta); \\ \xi_o &= -A \cdot \sin\left(\frac{Z_P}{Z_3} \cdot \omega_0 \cdot t\right), \end{aligned}$$

где $\Delta\Theta$ – величина отклонения углового шага развёртки.

Уравнение траектории движения центра последней пары зубьев относительно траектории, описанной первой парой зубьев второй ступени, будет иметь вид

$$\begin{aligned} v_o &= -A \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot t + Z_P \cdot \Delta\Theta \cdot \left(\frac{Z_P}{2} - 1\right)\right); \\ \xi_o &= -A \cdot \sin\left(\frac{Z_P}{Z_3} \cdot \omega_0 \cdot t\right). \end{aligned} \quad (6)$$

Для определения величины огранки, необходимо определить время пересечения траекторий первой пары зубьев и последней пары в точке соответствующей значению максимальной огранки отверстия.

Для определения времени пересечения траекторий в точке (А) относительно координаты v правую часть уравнения (3) приравняем правой части уравнения (6)

$$A \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) = A \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot t + Z_P \cdot \Delta\Theta \cdot \left(\frac{Z_P}{2} - 1\right)\right); \quad (7)$$

Решив уравнение (7) относительно t получим время, соответствующее $\rho_{A(1-Z/2)}$:

$$t_A = \frac{\arctan\left[\frac{\sin\left(Z_P \cdot \Delta\Theta \cdot \left(\frac{Z_P}{2} - 1\right)\right)}{\cos\left(Z_P \cdot \Delta\Theta \cdot \left(\frac{Z_P}{2} - 1\right)\right) - 1}\right]}{\omega_0}. \quad (8)$$

Траектории, описываемые двумя любыми парами зубьев, пересекаются в течении одного периода в точках А и С. Причём положение этих точек относительно друг друга определяется углом фазового сдвига, равным π , так как за время поворота инструмента на один угловой шаг его центр совершит один полный оборот. Тогда время, определяющее положение точки $C_{(1-\frac{Z}{2})}$, соответствующей максимальному значению

огранки отверстия при $\Delta\Theta \geq \Delta\Theta_{\min}$

$$t_C = \frac{\arctan\left[\frac{\sin\left(Z_P \cdot \Delta\Theta \cdot \left(\frac{Z_P}{2} - 1\right)\right)}{\cos\left(Z_P \cdot \Delta\Theta \cdot \left(\frac{Z_P}{2} - 1\right)\right) - 1}\right] - \pi}{\omega_0}. \quad (9)$$

После подстановки (9) в формулу (5), а затем значений радиус вектора $\rho_{C(1-Z/2)}$ – в выражение (4), получим формулу для определения огранки отверстия при параллельной схеме резания КИ зенкер-развёртка, при $\Delta\Theta \geq \Delta\Theta_{\min}$.

$$\Delta_{огр} = \sqrt{R_P^2 - 2A \cdot R_P \cdot \left(\sin(\alpha) \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{Z_P}\right) + \sin\left(\frac{Z_P}{Z_3} \cdot \alpha\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{Z_P}\right) \right)} + \sqrt{A^2 \cdot \left(\sin^2(\alpha) + \sin^2\left(\frac{Z_P}{Z_3} \cdot \alpha\right) \right)} - \sqrt{R_P^2 - 2A \cdot R_P \cdot \left(\sin(\beta + Z_P \cdot \Delta\delta) \cdot \cos\left(\frac{\beta}{Z_P} + \Delta\delta\right) \right)} + \sqrt{A^2 \cdot \left(\sin^2(\beta + Z_P \cdot \Delta\delta) + \sin^2\left(\frac{Z_P}{Z_3} \cdot \beta\right) \right)}$$

где $\alpha = \arctan\left[\frac{2 \cdot \left(\frac{Z_P}{Z_3} + 1\right)}{\left(\frac{Z_P^3}{Z_3^3} + 1\right)} \right] - \pi$; $\beta = \arctan\left[\frac{\sin(Z_P \cdot \Delta\delta)}{\cos(Z_P \cdot \Delta\delta) - 1} \right] - \pi$; $\Delta\delta = \Delta\Theta \cdot \left(\frac{Z_P}{2} - 1\right)$.

При $\Delta\Theta < \Delta\Theta_{\min}$ в выражении (10): $\beta = \arctan\left[\frac{\sin(Z_P \cdot \Delta\delta)}{\cos(Z_P \cdot \Delta\delta) - 1} \right]$; $\Delta\delta = \Delta\Theta$.

Проанализируем влияние чисел зубьев КИ зенкер-развёртка и величины отклонения угловых шагов развёртки на величину огранки, используя формулу (10). Результаты расчётов при $R_P = 15\text{мм}$; $A = 0,01\text{мм}$; $Z_3 = 3$ и 4 ; $Z_P = 8$, представлены на рис. 4.

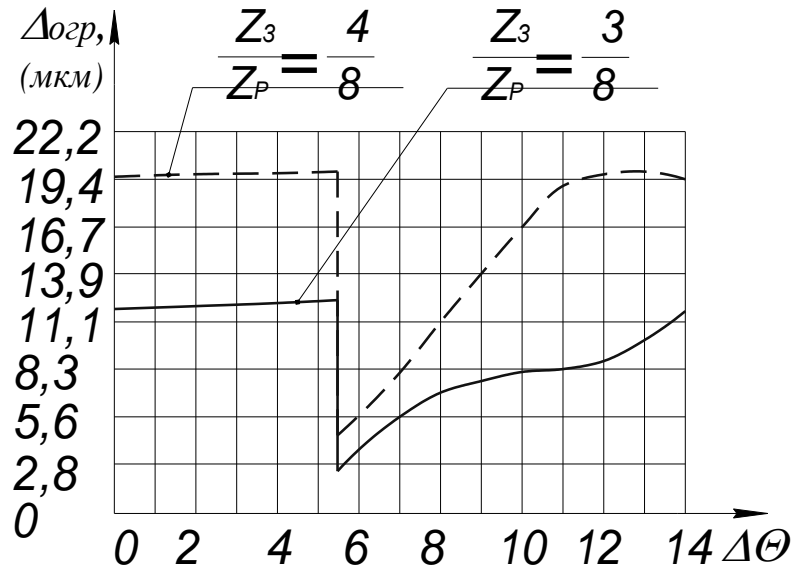


Рис. 4. Влияние числа зубьев КИ зенкер-развёртки и отклонения угловых шагов развёртки на величину огранки обработанного отверстия

Выводы

1) согласно разработанной математической модели образования огранки при параллельной схеме резания КИ зенкер-развёртка установлено, что оптимальное отклонение углового шага развёртки $\Delta\Theta = \Delta\Theta_{\min}$

2) для существенного снижения величины огранки отверстий при параллельной схеме резания достаточно использовать КИ зенкер-развёртка с рационально подобранным числом зубьев;

3) для устранения огранки необходимо уменьшить влияние факторов, оказывающих влияние на величину амплитуды колебаний инструмента;

4) разработанная модель определения величины огранки применима для КИ зенкер-развёртка, как с равномерным, так и с неравномерным распределением зубьев числовой ступени.

Список литературы: 1. Стрельцов В.А. Исследование технологических режимов развёртывания по стали. Автореф. канд. дис. МВТУ, 1965. – 24 с. 2. Холмогорцев Ю.П. Оптимизация процессов обработки отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 184 с. 3. Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов. М.: Машгиз, 1962. – 952 с. 4. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с. 5. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. – Киев: Вища школа, 1986. – 455с. 6. Кирсанов С.В., Гречишников В.А., Схиртладзе А.Г., Кокарев В.И. Инструменты для обработки точных отверстий. – М.: Машиностроение, 2003. – 330с. 7. Василенко Н.В. Теория колебаний: Учебное пособие – К.: Вища школа. 1992. – 430 с. 8. Малишко І.О. Основи теорії проектування осевих комбінованих інструментів. Автореф. докт. дис. – Київ, 1996. – 33 с.

АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВІДХИЛЕННЯ КУТОВОГО ШАГУ РОЗВЕРТКИ ПРИ ПАРАЛЕЛЬНІЙ СХЕМІ РІЗАННЯ КОМБІНОВАНИМ ІНСТРУМЕНТОМ ЗЕНКЕР-РОЗВЕРТКА

Мірошніченко О.В.

У статті розглядається питання визначення оптимального відхилення кутового кроку для другої ступені комбінованого інструменту зенкер-розвертка, що дозволяє набуті мінімального значення огранки отворів.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ УГЛОВОГО ШАГА РАЗВЁРТКИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СХЕМЕ РЕЗАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ЗЕНКЕР-РАЗВЁРТКА

Мирошніченко А.В.

В статье рассматривается вопрос определения оптимального отклонения углового шага второй ступени комбинированного инструмента зенкер-развёртка, позволяющего получить минимальное значение огранки обрабатываемых отверстий.

ANALYTICAL DETERMINATION OF OPTIMUM DEFLECTION OF ANGULAR SPACING OF REAMER AT PARALLEL CUTTING SCHEME BY COMBINATION TOOL CORE DRILL-REAMER

Miroshnichenko O.V.

In the paper the question of determination of optimum deflection of angular spacing for second step of combination tool core drill-reamer is considered, allowing to obtain the minimum value of side flatness of machined holes.

Рецензент: д.т.н., проф. Калафатова Л.П.