

## **Проектування прогресивних конструкцій різальних інструментів та технологічного оснащення**

УДК 621. 9.02

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЗАДНЮЮ ПОВЕРХНОСТЬ КОНЦЕВОГО ИНСТРУМЕНТА, С УЧЕТОМ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ**

**Малышко И.А., Тимохина В.Ю.**  
*(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)*

#### **Введение**

Погрешности формы поперечных сечений отверстий, обрабатываемых мерным концевым инструментом, в значительной мере обусловлены его поперечными колебаниями. Причиной колебаний являются переменные силы на режущих кромках инструмента.

При малой толщине срезаемого слоя (например, при чистовом развертывании или при нарезании резьбы метчиком) площадь контакта заготовки с задней поверхностью режущей кромки инструмента больше площади контакта по передней поверхности. В этом случае силы на задних поверхностях режущих кромок соизмеримы или превосходят силы, действующие на передних поверхностях кромок, и они в значительной мере определяют динамические процессы обработки отверстий мерным концевым инструментом и, соответственно, точность обработки [1].

Экспериментальное измерение сил на задних поверхностях концевого инструмента весьма сложная задача из-за большого количества режущих кромок и их сравнительно небольших размеров (в таких условиях тензометрирование затруднительно). Поэтому их определяют расчетом, исходя из расчетных схем и экспериментальных исследований сил на задних поверхностях резца [2, 3]. Наиболее полное определение сил на задней поверхности при наличии радиальных колебаний режущего инструмента приведено в [4] для развертки. Показано, что динамическое изменение рабочих задних углов режущих кромок вызывает изменение сил, действующих на задние поверхности.

Однако в работе [4] рассматриваются колебания инструмента вдоль одной из осей (т.е. система с одной степенью свободы). Такая схематизация является недостаточной при исследовании динамики процесса обработки отверстий мерным концевым инструментом. Для полного представления влияния поперечных колебаний на погрешность формы обрабатываемых отверстий необходимо исследовать систему, не менее, чем с двумя степенями свободы [1].

Целью настоящей статьи является установление влияния радиальных колебаний концевого инструмента в поперечной плоскости на силы, действующие на задние поверхности его режущих кромок.

#### **Основная часть**

Рассмотрим процесс обработки отверстия разверткой. На рис. 1 приведена схема резания одним зубом концевого инструмента без учета колебательного движения.

Положение зуба развертки в системе координат  $O\xi\xi$  определяется углом  $\varphi$  между передней поверхностью режущей кромки и осью  $O\xi$ . Режущая кромка зуба имеет радиус округления  $r$  и площадку износа. Согласно [4] после непродолжительной работы даже тщательно заточенный инструмент имеет радиус округления режущей кромки  $r = 8...9$  мкм.

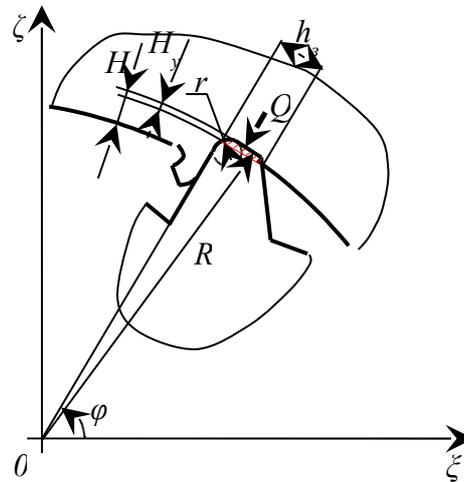


Рис.1. Схема резания без учета колебательного движения

В процессе резания зуб инструмента находится в состоянии упругого внедрения в заготовку. Непосредственно с режущей кромкой инструмента контактирует слой обрабатываемой поверхности заготовки толщиной  $H$ . Согласно [3] возникновение сил на задней поверхности обусловлено тем, что не весь слой толщиной  $H$  превращается в стружку. Часть этого слоя толщиной  $H_y$  остается на заготовке. При движении инструмента скругленная часть режущей кромки и задняя поверхность зуба сжимают (вдавливают) материал заготовки на величину  $H_y$  (деформируемый слой заготовки на рис. 1 отмечен штриховкой). В результате радиальной деформации материала заготовки на заднюю поверхность режущей кромки действует нормальная (направленная вдоль радиуса обрабатываемого отверстия) сила  $Q$ .

Толщина сжимаемого слоя  $H_y$  зависит от радиуса скругления режущей кромки у вершины угла заострения зуба, ширины площадки износа зуба по задней поверхности, характеристик обрабатываемого материала (твердости, коэффициента трения) и других факторов. Формулы для определения  $H_y$  приведены в [3, 5].

Длина  $h_s$  контакта задней поверхности инструмента зависит от размера площадки износа и величины заднего угла. Рекомендации по определению  $h_s$  с учетом динамического изменения заднего угла при колебательном движении инструмента даны в работе [4].

Согласно [3, 6] нормальная сила  $Q$  определяется зависимостью

$$Q = \frac{2H_y E \sqrt{bh_s}}{1 - \mu^2}, \quad (1)$$

где  $E, \mu$  – соответственно, модуль упругости и коэффициент Пуассона для обрабатываемого материала;  $b$  – ширина срезаемого слоя;  $h_s$  – длина контакта задней поверхности режущей кромки.

Сила трения режущей кромки по обрабатываемой поверхности

$$F_{mp} = f Q, \quad (2)$$

где  $f$  – коэффициент трения.

Продолжительность сжатия участка обрабатываемой поверхности длиной  $h_3$

$$\Delta t = \frac{h_3}{\omega R}, \quad (3)$$

где  $\omega$  – угловая скорость развертки;  $R$  – радиус режущей кромки.

После прохождения режущей кромкой участка обрабатываемой поверхности длиной  $h_3$  происходит упругое восстановление обработанной поверхности – она поднимается на величину  $H_y$  при упругих деформациях, а при пластических – на  $H_y' < H_y$ .

Приведенная схема образования сил на задней поверхности инструмента применима для случая изменения условий резания только за счет изменения припуска, как например, при развертывании предварительно обработанного отверстия, имеющего огранку. При этом силы, действующие на передней поверхности зуба, изменяются пропорционально изменению толщины срезаемого слоя, а силы на задней поверхности постоянны. Последнее обусловлено тем, что величины  $H_y$ ,  $h$  из формулы (1) не меняются, так как отсутствует смещение инструмента относительно заготовки вдоль радиуса.

Согласно [1, 2, 4] при обработке отверстий концевой инструмент совершает вынужденные поперечные колебания, что приводит к изменению условий резания за счет изменения припуска и относительных смещений инструмента и заготовки.

На рис. 2, а показана схема резания при наличии колебательного движения концевой инструмента. Из-за поперечных колебаний режущая кромка зуба кроме вращательного движения вместе с центром  $S$  развертки совершает поступательное движение вдоль осей  $0\zeta$  и  $0\zeta'$  со скоростями, соответственно,  $v$  и  $v'$ . На рисунке пунктиром показано одно из положений зуба без учета поперечных колебаний инструмента и сплошной линией – с учетом перемещений, обусловленных поперечными колебаниями.

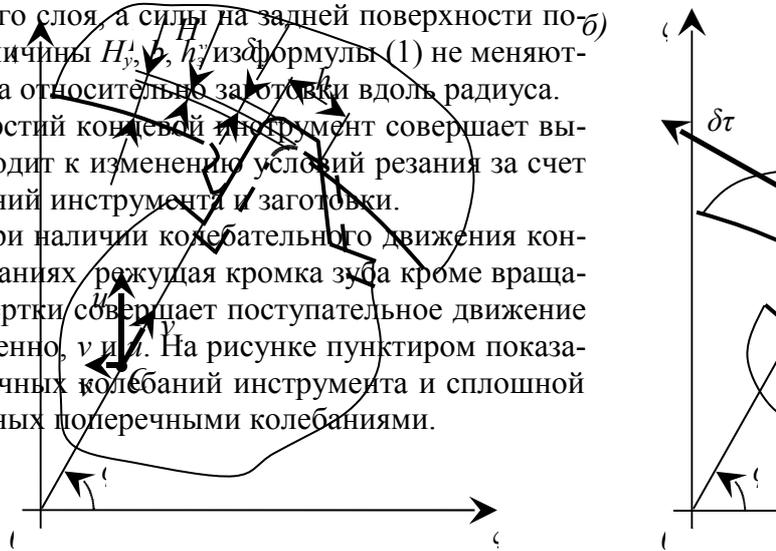


Рис. 2 – Схема резания при колебательном движении и перемещении режущей кромки (б)

Положение зуба развертки в системе координат  $0\zeta\zeta'$  определяется углом  $\varphi$  между передней поверхностью режущей кромки и осью  $0\zeta'$  и величинами  $\zeta$  и  $\zeta'$  – координатами

смещения центра  $C$  развертки и, соответственно, режущей кромки зуба вдоль осей  $O\zeta$  и  $O\xi$  из-за поперечных колебаний.

На рис. 2, б показаны соотношения между составляющими перемещения режущей кромки за время  $\Delta t$ :  $\zeta$  и  $\xi$  – перемещения, обусловленные поперечными колебаниями;  $\delta\tau$  – окружное перемещение;  $\delta r$  – радиальное перемещение.

Из схемы на рис. 2, б следует, что радиальное перемещение  $\delta r$  зуба (перемещение вдоль радиуса обрабатываемого отверстия) равно

$$\delta r = \xi \cos\varphi + \zeta \sin\varphi . \quad (4)$$

При движении зуба от центра обрабатываемого отверстия величина сжатия материала заготовки задней поверхностью складывается из величины  $H_y$  (величины деформации слоев материала заготовки при отсутствии колебательного движения инструмента) и радиального перемещения зуба  $\delta r$ . При движении зуба к центру величина сжатия материала заготовки задней поверхностью равна разности значений  $H_y$  и  $\delta r$ . В общем случае

$$H_y \pm \delta r . \quad (5)$$

Знак «+» следует принимать при удалении зуба инструмента от центра обрабатываемого отверстия, а знак «-» – при приближении инструмента к центру.

С учетом (1) и (5) нормальная сила  $Q$  с учетом колебательного движения инструмента составит

$$Q = \frac{2(H_y \pm \delta r) E \sqrt{bh_3}}{1 - \mu^2} . \quad (6)$$

В формуле (6) величина  $\delta r$  представляет собой радиальное смещение режущей кромки инструмента по отношению к ее предыдущему положению.

Определение изменения толщины среза из-за колебательного движения инструмента удобно выразить через скорости вдоль осей координат  $v$  и  $u$ , так как в этом случае нет необходимости учитывать предыдущее положение режущей кромки.

Величина изменения  $\delta r$  за время  $\Delta t$  сжатия материала задней поверхностью зуба на участке, равном ширине площадки износа  $h_3$ , будет

$$\delta r = v_R \Delta t , \quad (7)$$

где  $v_R$  – радиальная скорость инструмента вдоль его радиуса.

Так как окружная скорость  $v_t$  режущей кромки перпендикулярна радиусу, то ее проекция на радиальное направление равна нулю и величина  $v_R$  зависит только от  $v$  и  $u$ :

$$v_R = v \cos\varphi + u \sin\varphi . \quad (8)$$

Откуда

$$\delta r = \frac{(v \cos\varphi + u \sin\varphi) h_3}{\omega r} . \quad (9)$$

С учетом последней зависимости и (6) окончательно получим значение силы на задней поверхности режущей кромки

$$Q = \frac{2[H_y + (v \cos \varphi + u \sin \varphi) h_z / (\omega R)] E \sqrt{bh_z}}{1 - \mu^2}. \quad (10)$$

При известном значении нормальной силы силу трения можно определить по зависимости (2).

Суммы проекций нормальных сил и сил трения на оси  $O\zeta$  и  $O\xi$  будут

$$\begin{aligned} Q_\xi &= \sum_{i=1}^z Q_i \cos \varphi_i; & Q_\zeta &= \sum_{i=1}^z Q_i \sin \varphi_i; \\ F_{mp\xi} &= \sum_{i=1}^z F_{mp_i} \sin \varphi_i; & F_{mp\zeta} &= \sum_{i=1}^z F_{mp_i} \cos \varphi_i, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $i$  – индекс режущей кромки инструмента;  $z$  – число режущих кромок.

Оценим влияние колебательного движения на нормальную силу, действующую на заднюю поверхность режущей кромки развертки. Для этого сравним значения нормальной силы на режущей кромке развертки, вычисленные по уравнениям (1) и (10). Значение радиальной скорости получим из уравнений движения режущей кромки. Согласно [4] траектория движения  $i$ -того зуба развертки в координатах  $O\xi\xi$  описывается системой параметрических уравнений

$$\begin{aligned} \zeta_i &= R_i \cos(\omega t + \theta_i) + A \cos \omega_0 t; \\ \xi_i &= R_i \sin(\omega t + \theta_i) - A \sin \omega_0 t, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $R_i$  – радиус режущей кромки  $i$ -того зуба развертки;  $\theta_i$  – угол между режущими кромками 1 и  $i$ -того зуба развертки;  $A$ ,  $\omega_0$  – амплитуда и частота колебаний центра развертки.

Из (12) дифференцированием определяем скорости движения центра развертки вдоль координатных осей. Для режущей кромки развертки размером  $R = 20$  мм, с радиусами округления режущих кромок  $r = 0,008$  мм, и режимами резания  $b = S_z = 0,08$  мм/об,  $v = 200$  мм/с, соответствующей угловой скорости  $\omega = 10$  рад/с, длиной контакта задней поверхности инструмента  $h_z = 0,01$  мм, круговой частотой  $\omega_0 = 60$  рад/с, амплитудой колебаний  $A = 0,01$  мм значения скорости будут:  $v = 2,27$  мм/с,  $u = 1,96$  мм/с.

Значение нормальной силы без учета колебательного движения по формуле (1)  $Q = 72$  Н. Значение этой силы с учетом поперечных колебаний при (при  $\varphi = \omega t = 0,4$  рад) по формуле (9)  $Q = 104$  Н.

### Вывод

Как следует из числового примера, радиальные колебания концевой инструмента в поперечной плоскости оказывают существенное влияние на силы, действующие на задние поверхности его режущих кромок. Для учета этого влияния силы на задней поверхности необходимо рассчитывать по уточненной формуле (10).

**Список литературы: 1.** Холмогорцев Ю.П. Оптимизация процессов обработки отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 184 с. **2.** Родин П.Р. Металлорежущие инструмен-

ты. – К.: Вища школа, 1986. – 455 с. **3.** Железнов Г.С. Оценка сил, действующих на фаске износа инструмента на задней поверхности // Станки и инструмент. – 2003. – № 6. – С. 27-30. **4.** Малышко И.А. Исследование влияния конструктивных элементов разверток на точность обработки отверстий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Донецк. политехн. ин-т. – Донецк, 1979. – 25 с. **5.** Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машгиз, 1962. – 383 с. **6.** Галин Л.А. Контактные задачи упругости и вязкоупругости. – М.: Наука, 1980. – 256 с.

**ВИЗНАЧЕННЯ СИЛ, ЯКІ ДІЮТЬ НА ЗАДНЮ ПОВЕРХНЮ КІНЦЕВОГО  
ІНСТРУМЕНТА, З УРАХУВАННЯМ ПОПЕРЕЧНИХ КОЛИВАНЬ**

Малишко І.О., Тимохіна В.Ю.

Виведено формули для визначення нормальної сили на задній поверхні кінцевого інструмента з урахуванням коливального руху.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЗАДНЮЮ ПОВЕРХНОСТЬ  
КОНЦЕВОГО ИНСТРУМЕНТА, С УЧЕТОМ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ**

Малышко И.А., Тимохина В.Ю.

Выведены формулы для определения нормальной силы на задней поверхности концевой инструмента с учетом колебательного движения.

**CALCULATION OF FORCES ACTING ON THE BACK SURFACE OF  
AXIAL TOOLS TAKING INTO ACCOUNT THE LATERAL OSCILLATIONS**

Malishko I.A., Timokhina V.Y.

The formulas for calculation of normal forces acting on the back surface of axial tools taking into account oscillate motion are deduced.

*Рецензент: д.т.н., проф. Матюха П.Г.*