

## ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ ИНСТРУМЕНТА РАЗВЕРТКИ-МЕТЧИКА НА ЕГО ПОПЕРЕЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

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

*Influence of the combined tools tap-reamer type rigidity on the diametrical oscillations is examined. Under inflexible fixation of the tool in the chuck and uniform step of the tool's teeth rigidity is independent of rotation angle and does not make an impact upon oscillations. Under non-uniform step teeth dependence of the rigidity on rotation angle represents non-harmonic periodical function. Oscillation spectrum of the tool contains second and higher harmonics.*

Обработку ступенчатых отверстий, содержащих цилиндрическую часть с высоким полем допуска и резьбовую поверхность, целесообразно проводить комбинированным инструментом разверткой – метчиком. Для развертки – метчика, как и для других многолезвийных концевых инструментов, характерной погрешностью является огранка обрабатываемого отверстия. Огранка вызывается поперечными колебаниями инструмента [1, 2, 3].

Согласно [1], при развертывании в формировании поперечного сечения отверстия участвуют вплоть до 35-й гармоники. Первая гармоника определяет эксцентризитет сечения отверстия, вторая – овальность, третья – огранку с тремя гранями, четвертая - огранку с четырьмя гранями и т.д.

Закономерности чередования доминирующих (т.е. имеющих наибольшие амплитуды) гармоник определяются конструктивными параметрами инструмента.

Так согласно [2], для развертки с равномерным угловым шагом в большинстве случаев справедлива зависимость, связывающая число граней (волн) на поверхности отверстия с числом зубьев развертки

$$n = z + 1, \quad (1)$$

где  $n$  - число граней в поперечном сечении обработанного отверстия;  $z$  - число зубьев развертки.

Угловая частота колебаний развертки на этой гармонике

$$\omega_z = z \omega_0, \quad (2)$$

где  $\omega_z$  - угловая частота колебаний гармоники;  $\omega_0$  - угловая скорость развертки.

Появление высших гармоник в спектре поперечных колебаний многолезвийных концевых инструментов обусловлено нелинейными силовыми взаимодействиями в системе «режущий инструмент - заготовка» и действием ряда других факторов (неравномерной твердостью обрабатываемого материала, односторонним врезанием инструмента, погрешностями предыдущей обработки и др.).

Согласно [3], одной из причин этого является переменная (в зависимости от угла поворота и, соответственно, периодическая функция времени) жесткость инструмента. Такие колебания называются квазигармоническими.

Целью статьи является определение влияния формы поперечного сечения и жесткости комбинированного инструмента развертки-метчика на частотный спектр поперечных колебаний инструмента.

Основная часть. На рис. 1, *a* приведен комбинированный инструмент развертка-метчик, состоящий из ступеней развертки 1, метчика 2, хвостовика 3. Инструмент

закреплен в патроне (патрон показан пунктиром). Ступень развертки выполняют с четным числом зубьев и их равномерным или (для уменьшения огранки) неравномерным угловым распределением, ступень метчика – с равномерным угловым распределением.

Поперечные колебания развертки-метчика зависят от способа крепления инструмента в патроне. Способ крепления определяется точностью технологической системы: при высокой ее точности инструмент крепится жестко, а при низкой – в «плавающем» патроне. «Плавающие» патроны обеспечивают передачу от шпинделя к инструменту крутящего момента и при этом допускают радиальные и угловые перемещения инструмента. Это позволяет исключить влияние погрешностей вращения шпинделя на обработку отверстий.

На рис. 1, б приведена расчетная схема развертки-метчика при жестком закреплении. В этом случае инструмент представляет собой составную консольную балку с защемленным концом, состоящую из участков с разными поперечными сечениями. Колебания инструмента вызывают изгиб его продольной оси. Из-за изгиба возникает восстанавливающая сила (стремящаяся вернуть инструмент в положение равновесия), пропорциональная коэффициенту жесткости.

Для определенности изгиб будем рассматривать в плоскости  $O\xi\zeta$ . На расчетной схеме принято: число участков балки – 4; длины участков  $l_1, l_2, l_3, l_4$ ; осевые моменты инерции сечений участков  $J_{\zeta 1}, J_{\zeta 2}, J_{\zeta 3}, J_{\zeta 4}$ . Деформированная продольная ось балки показана пунктиром.

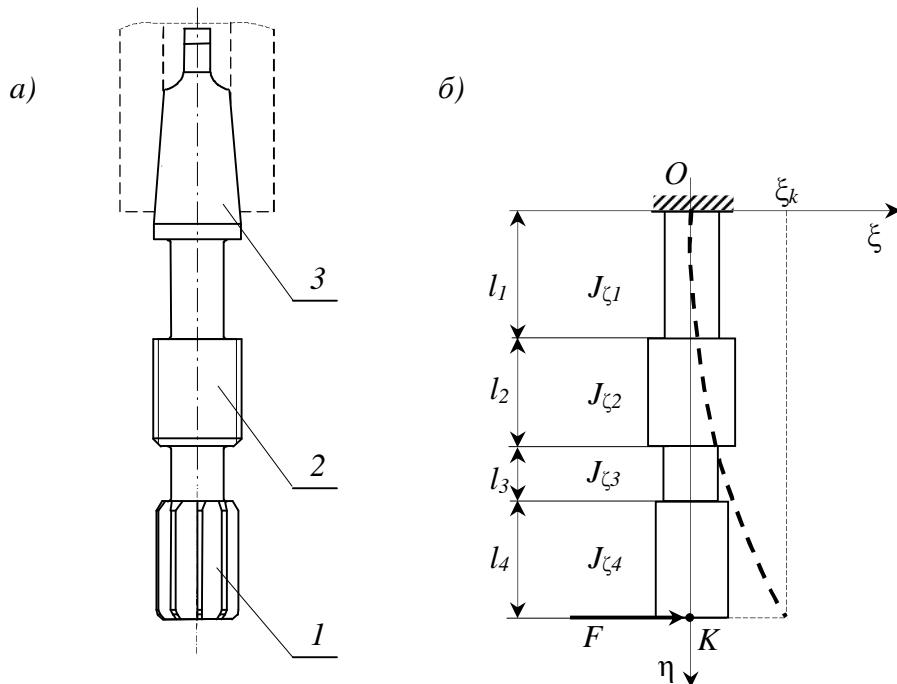


Рис. 1. Комбинированный инструмент развертка-метчик (а) и схема деформации инструмента при жестком закреплении в патроне (б)

Определим коэффициент жесткости инструмента. Прогиб  $\xi$  точки  $K$  консоли инструмента под действием силы  $F$  согласно [4] будет

$$\xi_K = \frac{F}{2} \left( \frac{A}{EJ_{\xi_1}} + \frac{B}{EJ_{\xi_2}} + \frac{C}{EJ_{\xi_3}} + \frac{D}{EJ_{\xi_4}} \right), \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости материала;  $A; B; C; D$  - коэффициенты;

$$A = (l_1 + l_2 + l_3 + l_4)(l_1^2 + 2l_1l_2 + 2l_1l_3 + 2l_1l_4) - l_1^3/3 - l_1^2l_2 - l_1^2l_3 - l_1^2l_4;$$

$$B = (l_2 + l_3 + l_4)(l_2^2 + 2l_2l_3 + 2l_2l_4) - l_2^3/3 - l_2^2l_3 - l_2^2l_4;$$

$$C = (l_3 + l_4)(l_3^2 + 2l_3l_4) - l_3^3/3 - l_3^2l_4);$$

$$D = 2l_4^3/3.$$

Из (3) находим коэффициент жесткости инструмента (отношение  $F/\xi_K$ )

$$k = 2 \left( \frac{A}{EJ_{\xi_1}} + \frac{B}{EJ_{\xi_2}} + \frac{C}{EJ_{\xi_3}} + \frac{D}{EJ_{\xi_4}} \right)^{-1}. \quad (4)$$

Рассмотрим изменение коэффициента жесткости величины по углу поворота инструмента. Все величины зависимости (4), кроме моментов инерции сечений  $J_{\xi_2}$  и  $J_{\xi_4}$  ступеней метчика и развертки, постоянны (не зависят от угла поворота инструмента), поэтому достаточно исследовать только изменения  $J_{\xi_2}$  и  $J_{\xi_4}$ .

Изменения моментов инерции сечений многолезвийных инструментов с равномерным угловым распределением зубьев рассмотрим на примере развертки с числом зубьев  $z$  и постоянным угловым шагом  $\Delta\psi = 2\pi/z$  (рис. 2).

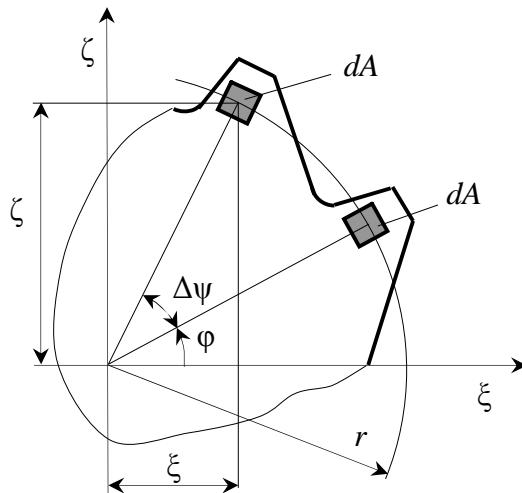


Рис. 2. Сечение развертки с числом зубьев  $z$

Вычислим сумму элементарных осевых и центробежного моментов инерции относительно осей  $0\xi$  и  $0\zeta$  из одинаковых элементарных площадок в точках, равноотстоящих от начала координат и друг от друга (обозначения понятны из рисунка)

$$\sum_{i=1}^z dJ_{\xi_i} = \sum_{i=1}^z \zeta^2 dA = \sum_{i=1}^z dA [r \sin(\varphi + (i-1) \frac{2\pi}{z})]^2 = dA r^2 z / 2; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^z dJ_{\xi i} = \sum_{i=1}^z \xi^2 dA = \sum_{i=1}^z dA [r \cos(\varphi + (i-1) \frac{2\pi}{z})]^2 = dA r^2 z / 2; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^z dJ_{\xi\xi i} = \sum_{i=1}^z \xi \zeta dA = \sum_{i=1}^z dA r \sin(\varphi + (i-1) \frac{2\pi}{z}) r \cos(\varphi + (i-1) \frac{2\pi}{z}) = 0. \quad (7)$$

При вычислении (5)...(7) использованы формулы из [5]

$$\sum_{i=1}^z \sin^2 [\varphi + (i-1) \frac{2\pi}{z}] = z/2; \quad \sum_{i=1}^z \cos^2 [\varphi + (i-1) \frac{2\pi}{z}] = z/2;$$

$$\sum_{i=1}^z \sin [\varphi + (i-1) \frac{2\pi}{z}] \cos [\varphi + (i-1) \frac{2\pi}{z}] = 0.$$

Из сравнения (5) и (6) следует

$$\sum_{i=1}^z dJ_{\xi} = \sum_{i=1}^z dJ_{\zeta}. \quad (8)$$

Интегрируя (7) и (8) по всей площади сечения инструмента, получим

$$J_{\xi\xi} = 0; \quad J_{\xi} = J_{\zeta}. \quad (9)$$

Согласно [4], осевой момент инерции сечения относительно произвольной оси, повернутой относительно исходной оси  $O\xi$  на угол  $\alpha$ , и с учетом (9) будет

$$J_o = J_{\xi} \sin^2 \alpha + J_{\zeta} \cos^2 \alpha + J_{\xi\xi} \sin 2\alpha = J_{\xi} = J_{\zeta} = const. \quad (10)$$

Из зависимости (10) следует, что для сечений метчика и развертки с равномерным угловым распределением зубьев изгибная жесткость  $EJ_0$  инструмента постоянна для любой плоскости действия изгибающего момента и, соответственно, коэффициент жесткости из (4) не изменяется при повороте инструмента и не может быть причиной появления высших гармоник в спектре его колебаний.

Изменения осевых моментов сечений многолезвийных инструментов с неравномерным угловым распределением зубьев по углу поворота исследуем на основании зависимости (10). В общем случае для таких сечений

$$J_{\xi\xi} \neq 0; \quad J_{\xi} \neq J_{\zeta}. \quad (11)$$

Заменив в (10) квадраты синуса и косинуса их значениями через функции двойного угла и учитывая, что угол поворота инструмента за время  $t$  равен

$$\alpha = \omega_0 t,$$

после преобразований получим зависимость осевого момента от времени

$$J_o = \frac{J_{\xi} + J_{\zeta}}{2} + \frac{J_{\zeta} - J_{\xi}}{2} \cos 2\omega_0 t + J_{\xi\xi} \sin 2\omega_0 t. \quad (12)$$

Из (12) следует, что осевой момент инерции сечения (и, соответственно, изгибная жесткость  $EJ_0$ ) при неравномерном угловом распределении зубьев по углу поворота инструмента изменяется по гармоническому закону. Одному обороту инструмента соответствует два цикла изменения изгибной жесткости. Количество

циклов изменения изгибной жесткости за один оборот не зависит от числа зубьев инструмента.

На рис. 3 приведен график изменения коэффициента жесткости в зависимости от угла поворота для комбинированного инструмента на рис.1, у которого ступень развертки выполнена с неравномерным угловым распределением. График получен подстановкой в (4) вместо осевого момента инерции  $J_{\xi 4}$  ступени развертки его значения по формуле (12). Сами аналитические зависимости не приводятся из-за их громоздкости.

График представляет собой негармоническую периодическую функцию с угловой частотой основной гармоники  $2\omega_0$ , которая может быть представлена гармоническим рядом Фурье с высшими гармониками, кратными основной. Такое изменение коэффициента жесткости инструмента приводит к появлению в спектре колебаний инструмента гармоник с частотами  $2\omega_0$ ,  $4\omega_0$ ,  $6\omega_0$  и т.д. Решение дифференциального уравнения динамики режущего инструмента при гармоническом изменении коэффициента жесткости приведено в [3].

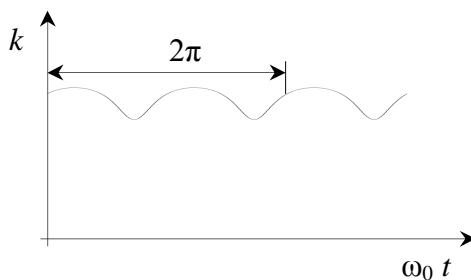


Рис. 3. График изменения коэффициента жесткости при повороте инструмента

Следует, однако, отметить, что даже при малом числе зубьев развертки и большой неравномерности их углового распределения отношение минимального и максимального осевых моментов инерции сечения инструмента составляет  $J_{\min}/J_{\max} > 0,95$ . Поэтому в ряде случаев отношение минимального и максимального коэффициентов жесткости развертки-метчика практически равно 1 и изменением жесткости по углу поворота можно пренебречь.

При «плавающем» закреплении в патроне инструмент имеет возможность радиальных и угловых перемещений. При этом инструмент не изгибаются, восстанавливающая сила не возникает и жесткость инструмента не оказывает никакого влияния на колебания инструмента. Его движение в этом случае полностью определяется силами сопротивления резанию, действующими на режущие кромки зубьев.

**Выводы.** Огранка отверстий при обработке мерным концевым инструментом образуется из-за наличия спектре его колебаний высших гармоник. Одной из причин их возникновения является переменная по углу поворота жесткость инструмента.

У комбинированного инструмента развертки - метчика с равномерным угловым распределением зубьев рабочих ступеней коэффициент жесткости не зависит от угла поворота инструмента и, поэтому, не может быть причиной появления высших гармоник в спектре его колебаний.

При неравномерном угловом распределении зубьев хотя бы на одной рабочей ступени зависимость коэффициента жесткости от угла поворота инструмента представляет собой негармоническую периодическую функцию с частотой основной гармоники, в 2 раза большей частоты вращения инструмента. Это приводит к появлению в спектре колебаний инструмента высших гармоник.

При «плавающем» закреплении в патроне инструмент не деформируется и его жесткость не оказывает влияния на его движение.

Однако, как показывает практика, огранка отверстий возникает во всех выше перечисленных случаях и, следовательно, переменная по углу поворота жесткость инструмента не является ее единственной причиной.

Причиной возникновения колебаний (наряду с переменной жесткостью), по-видимому, является существенная нелинейность процессов, происходящих в зоне резания. Решающее влияние при этом оказывают динамические составляющие сил резания. Предложенная в [6] динамическая модель формирования силы резания с переменным запаздыванием учитывает запаздывание изменения силы резания от изменения площади срезаемого слоя. Эта модель демонстрирует широкий спектр видов колебаний, которые могут представлять собой компоненты колебательных движений в реальных системах резания.

Поэтому наиболее целесообразным является использование в моделях динамики обработки отверстий комбинированным инструментом разверткой-метчиком не только уравнений, учитывающих переменную жесткость инструмента при его повороте, но и уравнений формирования силы резания с переменным запаздыванием.

**Список литературы:** 1. Кирсанов С.В. Влияние конструкции развертки на огранку обработанных отверстий // Станки и инструмент. - 2000. - № 4. - С. 22-23. 2. Малышко И.А. Основы проектирования осевых комбинированных инструментов: Диссертация д-ра техн. наук: 05.03.01. – Киев, 1996. – 430 с. 3. Холмогорцев Ю.П. Оптимизация процессов обработки отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 184 с. 4. Чехладзе Э.Д. Сопротивление материалов. – Харьков: УкрГАЖТ, 2002. – 362 с. 5. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М.: Наука, 1978. – 125 с. 6. Лукьянов А.Д. Динамическая модель формирования силы резания с переменным запаздыванием // СТИН. – 2007. -№8. – С. 8-12.

Надійшла до редколегії 12.05.2009 р.

## **ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ ИНСТРУМЕНТА РАЗВЕРТКИ-МЕТЧИКА НА ЕГО ПОПЕРЕЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ**

**Тимохина В.Ю., Малышко И.А.**

Метою статті є визначення впливу форми поперечного перетину і жорсткості комбінованого інструменту розгортки-мітчика на частотний спектр поперечних коливань інструменту.

**жесткость инструмента, поперечные колебания, форма сечения,  
ступенчатое отверстие**