

Электронная микроскопия покрытий, выполненная с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201 JEOL, показала наличие плотносспекшейся структуры покрытий, в которых отмечаются изометричные кристаллы размером 0,1–3 мкм, равномерно расположенные по поверхности скола. Наблюдаются единичные поры, хаотично расположенные на анализируемой поверхности, размер которых составляет 0,3–1 мкм.

С целью повышения реологических характеристик суспензий и лучшего сцепления ангобного покрытия с карбидокремниевыми плитами исследовалось влияние добавок электролитов, в результате которых установлено положительное влияние триполифосфата натрия, водимого при помеле суспензии в количестве 0,2% сверх 100.

Исследования синтезированных ангобных покрытий в условиях ЗАО «Керамик-Веско» «Добрушский фарфоровый завод» показали хорошие технологические свойства покрытий промазок по укрывистости огнеупорного припаса, сцеплению с огнеупорной основой и отсутствию вырыва ножек обжигаемых фарфоровых изделий при длительной эксплуатации плит, ресурс которой составил 100 циклов.

Применение синтезированных ангобных покрытий показывает устранение дефекта вырыва ножки и засорки фарфоровых изделий.

УДК 621.941.1

Минальд Ю.И.

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТОКАРНОГО РЕЗЦА ПРИ ВИБРАЦИОННОМ РЕЗАНИИ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ**

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск,  
Республика Беларусь*

*Научные руководители: канд. физ-мат. наук, доцент Лошкарева С.Ю.,  
канд. техн. наук, доцент Молочко В.И.*

При вибрационном резании суммарная траектория движения резца складывается из двух движений – поступательного перемещения инструмента вместе с суппортом станка и колебательного перемещения резца под действием задающего устройства. Цикл колебательного движения может быть охарактеризован так называемым коэффициентом асимметрии  $\xi = a/b$ ,

*Секция «Новые материалы и перспективные технологии обработки материалов»*

где  $a$  и  $b$  – временные периоды перемещения инструмента в направлении основной подачи (ход вперед) и против этого направления (ход назад).

При традиционном вибрационном резании периоды прямого  $a$  и обратного  $b$  ходов в цикле колебаний равны, поэтому в этом случае коэффициенты асимметрии цикла  $\xi = a/b = 1$ . При асимметричном вибрационном резании  $a \neq b$ , поэтому коэффициент асимметрии цикла либо меньше ( $a < b$ ), либо больше ( $a > b$ ) единицы. Когда коэффициент  $\xi = 1$ , в качестве задающего устройства может быть использован эксцентрик, обеспечивающий цикл колебаний инструмента, близкий к синусоидальному. Когда коэффициент  $\xi \neq 1$  необходимо использовать специальный кулачек

При использовании станков с числовым программным управлением необходимость в специальных механизмах, задающих колебательное движение резца, вообще отпадает, поскольку необходимая траектория перемещения инструмента может быть обеспечена программированием. Однако расчет характеристик движения инструмента на отдельных этапах цикла производится исходя из предположения наличия поступательного движения суппорта и колебательного движения инструмента по циклу, определяемому заданным значением коэффициента  $\xi$ .

Математическое колебательное движение инструмента, реализуемое на станках с числовым программным управлением, в первом приближении может быть описано системой линейных уравнений:

$$f(\varphi) = \begin{cases} \frac{2A}{a} \varphi, & \text{при } 0 \leq \varphi \leq \frac{a}{2} \\ \frac{-2A}{2\pi-a} \varphi + \frac{2\pi A}{2\pi-a}, & \text{при } \frac{a}{2} \leq \varphi \leq 2\pi - \frac{a}{2} \\ \frac{2A}{a} \varphi - \frac{4\pi A}{a}, & \text{при } 2\pi - \frac{a}{2} \leq \varphi \leq 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

где  $\varphi$  – текущий угол, рад.,  $a$  – угол поворота при прямом ходе резца рад.,  $b$  – угол поворота при обратном ходе резца, рад.

При использовании таких функций расчеты технологических параметров резания, например, мгновенной толщины среза, приходится вести покусочно (поэтапно), что не всегда удобно. Однако линейно-кусочная функция с помощью ряда Фурье может быть выражена одним общим уравнением, представляющим собой сумму гармоник колебаний разной амплитуды и частоты. Отбрасывая часть членов, представляющих гармоники высшего порядка, можно получить одно приближенное уравнение асимметричных колебаний инструмента, обеспечивающее расчет требуемых технологических параметров резания с заданной степенью точности.

При использовании ряда Фурье система линейных уравнений (1) может быть представлена одним уравнением типа

$$f(\varphi) = \frac{a_0}{2} + a_1 \sin \varphi + b_1 \cos \varphi + a_2 \sin 2\varphi + \dots + a_k \sin k\varphi + b_k \cos k\varphi \quad (2)$$

Так как функция (2) нечетная ( $f(\varphi) = -f(-\varphi)$ ), то она может быть представлена в виде

$$f(\varphi) = b_1 \sin \varphi + b_2 \sin 2\varphi + b_3 \sin 3\varphi + \dots + b_k \sin k\varphi, \quad (3)$$

где  $k = 1, 2, \dots, \infty$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\varphi) \sin k\varphi d\varphi, \quad (4)$$

Подставляя в уравнение (4) значения функции (1), получим

$$b_k = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2A\varphi}{a} \sin k\varphi d\varphi + \int_{\frac{a}{2}}^{2\pi - \frac{a}{2}} \frac{2\pi A}{2\pi - a} \sin k\varphi d\varphi + \int_{\frac{\pi}{2}}^{2\pi - \frac{a}{2}} \frac{2A\varphi}{2\pi - a} \sin k\varphi d\varphi + \int_{2\pi - \frac{a}{2}}^{2\pi} \frac{2A\varphi}{a} \sin k\varphi d\varphi - \int_{2\pi - \frac{a}{2}}^{2\pi} \frac{4\pi A}{a} \sin k\varphi d\varphi \right] =$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[ \frac{2A}{a} \left( -\frac{\varphi \cos k\varphi}{k} \Big|_0^{a/2} + \frac{\sin k\varphi}{k^2} \Big|_0^{a/2} \right) + \frac{2A}{2\pi - a} \left( -\frac{\pi \cos k\varphi}{k} \Big|_{a/2}^{2\pi - a/2} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{2A}{2\pi - a} \left( -\frac{\varphi \cos k\varphi}{k} \Big|_{a/2}^{2\pi - a/2} + \frac{\sin k\varphi}{k^2} \Big|_{a/2}^{2\pi - a/2} \right) + \frac{2A}{a} \left( -\frac{\varphi \cos k\varphi}{k} \Big|_{2\pi - a/2}^{2\pi} + \frac{\sin k\varphi}{k^2} \Big|_{2\pi - a/2}^{2\pi} - \frac{2\pi \cos k\varphi}{k} \Big|_{2\pi - a/2}^{2\pi} \right) \right] =$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[ \frac{2A}{a} \left( -\frac{a \cos k \frac{a}{2}}{2k} + \frac{\sin k \frac{a}{2}}{k^2} \right) + \frac{2A}{2\pi - a} \left( -\frac{\pi}{k} \cos k \left( 2\pi - \frac{a}{2} \right) + \frac{\pi}{k} \cos k \frac{a}{2} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{2A}{2\pi - a} \left( \frac{2\pi - \frac{a}{2}}{-k} \cos k \left( 2\pi - \frac{a}{2} \right) + \frac{a}{2k} \cos k \frac{a}{2} + \frac{\sin \left( k \left( 2\pi - \frac{a}{2} \right) \right)}{k^2} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{2A}{2\pi - a} \left( -\frac{\sin k \frac{a}{2}}{k^2} \right) + \frac{2A}{a} \left( -\frac{2\pi \cos 2\pi k}{k} + \left( 2\pi - \frac{a}{2} \right) \frac{\cos k \left( 2\pi - \frac{a}{2} \right)}{k} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{2A}{a} \left( +\frac{\sin 2\pi k}{k^2} - \frac{\sin k \left( 2\pi - \frac{a}{2} \right)}{k^2} - \frac{2\pi \cos 2\pi k}{k} + 2\pi \frac{\cos k \left( 2\pi - \frac{a}{2} \right)}{k} \right) \right]$$

После группирования членов, содержащих функцию  $\sin$  и  $\cos$ , приходим к выражению

$$b_k = \frac{8A}{a(2\pi - a)k^2} \sin \frac{ka}{2}$$

Тогда функция (2) принимает вид

$$f(\varphi) = \frac{8A}{\alpha(2\pi - \alpha)} \sin \frac{\alpha}{2} \sin \varphi + \frac{8A}{\alpha(2\pi - \alpha)2^2} \sin \frac{2\alpha}{2} \sin 2\varphi + \dots + \frac{8A}{\alpha(2\pi - \alpha)k^2} \sin \frac{k\alpha}{2} \sin k\varphi$$

или

$$f(\varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8A}{\alpha(2\pi - \alpha)k^2} \sin \frac{k\alpha}{2} \sin k\varphi \quad (5)$$

Недостатком этой функции является бесконечное количество членов. Современные металлообрабатывающие станки могут обеспечить точность подачи до 0,01...0,001 мм, что дает основание ограничиться точностью до 2-х или 3-х знаков после запятой.

Чтобы определить  $k$ , обеспечивающее данную точность, была использована программа Turbo Pascal. Было выявлено, что для обеспечения точности до 0,01 мм, можно ограничиться значением  $k=5$ , а для обеспечения точности до 0,001 мм – значением  $k=9$ .

Для иллюстрации указанных выводов рассмотрим графики функций (1) и (5) (рисунок 1), построенные исходя из следующих данных  $\xi = a / b = 1/2$ ,  $A=1$ . Поскольку  $a + b = 2\pi$ , то  $a=2\pi/3$  или  $a/2 = 60^\circ$ .

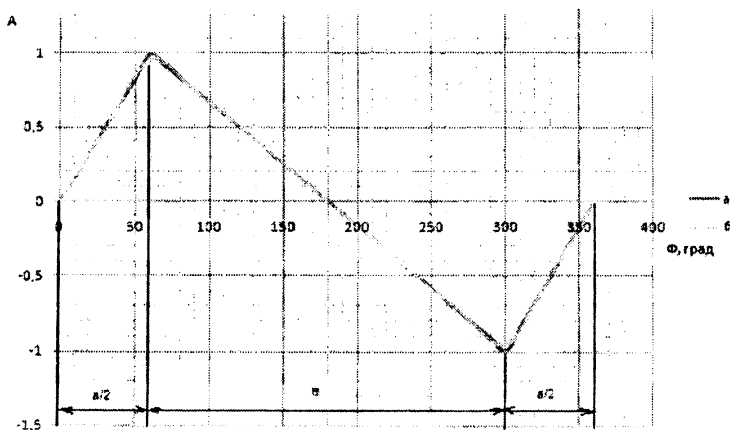


Рисунок 1 – Колебания инструмента

Так как графики практически совпадают, можно сделать вывод о том, что функция (5) подходит для описания асимметричных линейных колебаний инструмента.