ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Տեխնիկական գիտություններ, հատոր XXXIV, № 3, 1981 Серия технических наук

МАШИНОСТРОЕНИЕ

А. Г. ГАДУКЯН, Г. Г. ОВАКИМЯН

РАСЧЕТ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ФРЕЗ С УЧЕТОМ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

В процессе резания, ввиду статической податливости систем и наличия колебательных процессов, происходит изменение траектории относительного движения инструмента и детали. Это приводит к изменению мгновенных значений режимов резания и геометрических углов заточки, количественное определение которых необходимо для выявления последствий изменения траектории движения на стойкость инструмента.

Процесс фрезерования характеризуется наличием колебаний, отражающих прерывистость процесса и обуславливающих отжатия системы СПИД с периодом, равным времени работы одного зуба инструмента и классифицируемых как вынужденные, с частотой $f_к$, а также колебаний системы СПИД, зависящих от ее характеристик, процесса стружкообразования и внешних условий, с частотой $f_с$. Спектр этих колебаний состоит из двух видов колебаний — вынужденных и автоколебаний.

В общем случае вибросмещения фрезы и детали можно разложить по трем взаимно-перпендикулярным направлениям — по направлению подачи X, перпендикулярно ей Y и в осевом направлении Z.

Теоретическая траектория движения фрезы определяется частотой вращения инструмента и подачей [1] и выражается уравнениями:

$$\begin{cases} \Delta X_{\text{п}} = r \cdot \sin \dfrac{50}{3} \cdot \dfrac{V}{r} \cdot t \pm \dfrac{S_{\text{м}}}{60} \cdot t; \\ \Delta Y_{\text{п}} = 2r \cdot \sin^2 \dfrac{25}{3} \cdot \dfrac{V}{t} \cdot t, \end{cases}$$

где $\Delta X_{\text{п}}$, $\Delta Y_{\text{п}}$ — смещение фрезы, *мм*; r — радиус фрезы, *мм*; V — скорость резания, *м/мин*; t — время, определяющее мгновенное положение кромки зуба на дуге контакта, *сек*; $S_{\text{м}}$ — минутная подача, *мм/мин*.

Колебания на частотах $f_к$ и $f_с$ мало отличаются от синусоидальных кривых и это позволяет с достаточной степенью точности аппроксимировать виброграммы колебаний синусоидальными кривыми. Анализ многочисленных осциллограмм позволил выделить две группы кривых вынужденных колебаний на $f_к$ (рис. 1) — кривые при $0{,}8 \leqslant z' < 1$ и при

$z' > 1$, где z' — число одновременно работающих зубьев. Эти кривые аппроксимируются уравнениями (1) и (2), соответственно, для встречного и попутного фрезерования:

$$\begin{cases} \Delta X_n = h_x + 2A_x \sin^2 \dfrac{\pi}{T_n} T; \\ \Delta Y_n = h_y - 2A_y \sin\left(\dfrac{2\pi}{T_n} T + \varphi\right); \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Delta X_n = h_{x'} + A_{x'} \sin\left(\dfrac{2\pi}{T_n} T + \varphi\right); \\ \Delta Y_n = h_{y'} - 2A_{y'} \sin^2 \dfrac{\pi}{T_n} T, \end{cases} \quad (2)$$

где ΔX_n, ΔY_n — смещения фрезы, определяемые наличием колебаний на $f_к$, *мм*; h_x, h_y — постоянное смещение центра фрезы, *мм*; A_x, A_y — амплитуды колебаний, *мм*; T_n — период колебаний, *сек*; T — время, определяющее мгновенное положение определенной точки режущей кромки на дуге контакта, *сек*; φ — фазовый сдвиг, *рад*.

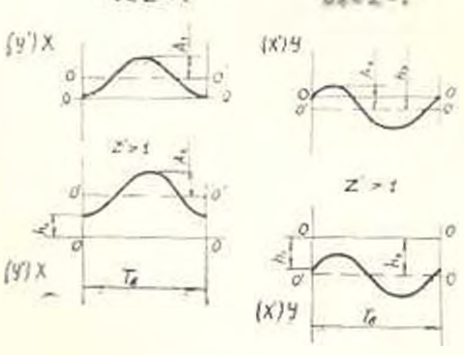

Рис. 1.

Период вынужденных колебаний на $f_к$ соответствует времени работы одного зуба [2] и определяется выражением:

при $z' < 1$ $\quad T_n = 0{,}06 \dfrac{l + B \cdot \operatorname{tg} \omega}{V}$,

при $z' > 1$ $\quad T_n = \dfrac{60}{n \cdot z}$,

а время T —

$$T = t + 0{,}06 \frac{L \cdot \operatorname{tg} \omega}{V}. \quad (3)$$

Здесь L — расстояние исследуемой точки режущей кромки от торца фрезы, измеренное в осевой плоскости, *мм*; l — длина дуги контакта, *мм*; B — ширина фрезерования, *мм*; ω — угол наклона режущей кромки, *град*; n — частота вращения фрезы, *об/мин*; z — число зубьев фрезы.

Фазовый сдвиг, обусловленный знакопеременностью составляющей, зависит от параметров фрезерования и определяется формулой:

$$\varphi = \arcsin \frac{h_{y.x} - h_1 \cdot k}{A_{y.x}}, \quad (4)$$

где h_1 — начальное отклонение фрезы, *мм*; k — коэффициент, зависящий от числа одновременно работающих зубьев: при $z' < 1$ $k = 0$, а при $z' > 1$ $k = 1$.

Смещения фрезы ΔX_a, ΔY_a, обусловленные наличием колебаний на частотах f_c, представляются в виде алгебраической суммы доминирующих в частотном спектре гармоник и определяются формулой:

$$\begin{cases} \Delta X_a = a_{x_1} \sin\left\{\dfrac{2\pi}{T_{a_{x_1}}}\left[T + \dfrac{60}{nz}(q-1)\right]\right\} + \\ \quad + \cdots + \sin\left\{\dfrac{2\pi}{T_{a_{x_i}}}\left[T + \dfrac{60}{nz}(q-1)\right]\right\}; \\ \Delta Y_a = a_{y_1} \sin\left\{\dfrac{2\pi}{T_{a_{y_1}}}\left[T + \dfrac{60}{nz}(q-1)\right]\right\} + \\ \quad + \cdots + \sin\left\{\dfrac{2\pi}{T_{a_{y_i}}}\left[T + \dfrac{60}{nz}(q-1)\right]\right\}. \end{cases} \tag{5}$$

где a_x, a_y и T_{a_x}, T_{a_y} — амплитуды и периоды отдельных гармоник колебаний в принятых направлениях, *мм* и *сек*; q — порядковый номер зуба.

В соответствии с изложенным выше, параметрическое уравнение истинной траектории движения фрезы представляется в виде

$$\begin{cases} X = \Delta X_{\text{ц}} - \Delta X_{\text{в}} - \Delta X_a; \\ Y = \Delta Y_{\text{ц}} - \Delta Y_{\text{в}} - \Delta Y_a. \end{cases} \tag{6}$$

Дифференцируя уравнение (6), можно получить истинные значения скорости резания $V_{\text{ист}}$ в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Абсолютное ее значение определяется уравнением:

$$V_{\text{ист}} = 0{,}06 \sqrt{(dX)^2 + (dY)^2}, \tag{7}$$

где $dX = (\Delta \dot{X}_{\text{ц}} - \Delta \dot{X}_{\text{в}} - \Delta \dot{X}_a)\,dt$, $dY = (\Delta Y_{\text{ц}} - \Delta \dot{Y}_{\text{в}} - \Delta Y_a)\,dt$ — скорости по направлению и перпендикулярно подаче.

Истинная длина дуги контакта определяется интегрированием (7) и выражается уравнением:

$$L_{\text{ист}} = \int_0^{T_\psi} V_{\text{ист}} \cdot dt, \tag{8}$$

где T_ψ — время, соответствующее максимальному углу контакта зуба ψ, *сек*.

Мгновенное значение изменений статических углов заточки θ определяется как угол между вектором истинной и теоретической скоростей движения в любой точке дуги контакта и поэтому

$$\theta = \arccos\left|\frac{(\bar{V}_{\text{ист}} \cdot \bar{V}_{\text{т}})}{|\bar{V}_{\text{ист}}| \cdot |\bar{V}_{\text{т}}|}\right|, \tag{9}$$

где $(V_{ист} \cdot V_т) = dX_{ист} \cdot dX_т + dY_{ист} \cdot dY_т$ — скалярное произведение векторов истинной и теоретической скоростей резания; $dX_{ист}$, $dX_т$, $dY_{ист}$, $dY_т$ — соответствующие значения составляющих истинной и теоретической скоростей резания, определяемых по формулам (6) и (7).

Истинную траекторию движения зубьев фрезы можно представить уравнением:

$$\begin{cases} X = \Delta X_0 - \Delta X_n - \Delta X_a + S_z (q - 1); \\ Y = \Delta Y_0 - \Delta Y_n - \Delta Y_a, \end{cases} \tag{10}$$

где

$$\Delta X_0 = r \sin \frac{50}{3} \cdot \frac{V}{r} t; \qquad \Delta Y_0 = 2r \cdot \sin^2 \frac{25}{3} \cdot \frac{V}{r} t.$$

Для расчета толщины среза необходимо определить связь между мгновенными углами контакта двух последовательных положений траектории движения зубьев фрезы (рис. 2). Из $\Delta O_1 N O_2$ имеем

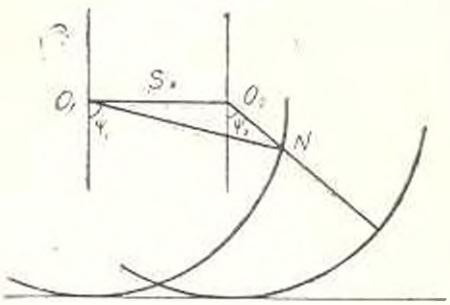

Рис. 2.

$$\frac{S_z}{\sin(\psi_1 - \psi_2)} = \frac{r}{\cos \psi_2},$$

откуда

$$\psi_2 = \operatorname{arc\,tg} \left| \operatorname{tg} \psi_1 - \frac{S_z}{r \cos \psi_2} \right|.$$

Связь между мгновенными углами контакта двух последовательных положений траектории движения зубьев фрезы можно представить выражением:

$$t_2 = 0{,}06 \frac{r}{V} \left\{ k + \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg} \left(\frac{50}{3} \cdot \frac{V}{r} t_1 \right) - \frac{S_z}{r \cos \left(\frac{50}{3} \cdot \frac{V}{r} t_1 \right)} \right] \right\}, \tag{11}$$

где t_1, t_2 — времена, определяющие мгновенное положение предыдущего и последующего зубьев, *сек*; $k = 0$ при $0{,}06 \frac{r}{V} \arcsin \frac{S_z}{2r} \leqslant t_1 < 0{,}03 \frac{\pi r}{V}$ и $k = \pi$ при $0{,}03 \frac{\pi r}{V} < t_1 \leqslant 0{,}06 \frac{\pi \cdot r}{V}$.

Подставив расчетные данные, определенные по формуле (11), в уравнение (10), можно определить координаты точек, характеризующие величину мгновенной толщины среза, и по формуле (12) вычислить истинную величину толщины среза в любой точке траектории движения фрезы

$$a = V \overline{(X_{q+1} - X_q)^2 + (Y_{q+1} - Y_q)^2}. \tag{12}$$

Посредством специально разработанного индуктивного приспособления и осциллографа измерялись амплитуда и частота колебаний концевых фрез в горизонтальной плоскости. Эксперименты проведены на станке модели 654 при обработке стали 18Х2Н4ВА и ЭИ-787 концевыми фрезами марки Р6М5 $d = 16$ *мм*, с жесткостью $j = 200 \div 1200$ *кгс/мм*. Режимы резания: $B = 2 \div 24$ *мм*; $t = 2 \div 16$ *мм*; $S = 0{,}02 \div 0{,}2$ *мм/зуб*; $V = 15 \div 62{,}5$ *м/мин*.

По амплитудам и частотам спектра колебаний определенных вариаций элементов режимного поля и конструктивных параметров инструмента на ЭВМ рассчитаны изменения скорости резания, статических углов заточки и толщины среза.

Анализ выявил неоднозначное влияние вынужденных колебаний f_1 на траекторию режущей кромки, что обусловлено наличием угла наклона режущей кромки, который изменяет вектор смещения центра фрезы относительно точек режущей кромки.

Расчеты показывают, что изменения теоретической траектории движения, обусловленные наличием колебаний с частотой f_c, являются причиной выхода режущей кромки из контакта с заготовкой, что является источником дополнительных высокочастотных динамических ударов на режущую кромку.

С уменьшением скорости резания увеличивается количество циклов нагружения режущей кромки от колебаний с частотой f_1, вследствие большего времени нахождения зуба на длине дуги контакта, что приводит к более интенсивному изменению рассматриваемых параметров. Это обуславливает повышенную «чувствительность» к вибрациям труднообрабатываемых материалов.

В зависимости от отношения времени начала контакта исследуемой точки режущей кромки с заготовкой, со временем, соответствующим максимальному углу контакта, предопределяются особенности изменения толщины среза точек, расположенных по длине режущей кромки. В зависимости от этого соотношения толщина среза может в процессе входа инструмента в заготовку измениться до 2 раз. Это способствует не только периодическому выходу зуба из контакта с заготовкой, но и увеличивает проскальзывание режущего лезвия до момента врезания и приводит к повышенному износу в верхних точках контакта. Анализ осциллограмм колебаний и сил резания выявил, что мгновенная величина отжатий для одних и тех же углов контакта φ_z возрастает с перемещением режущей точки от торца концевой фрезы в пределах одного периода вынужденных колебаний на f_1, что обуславливает также увеличенное изменение углов заточки. Таким образом, наличие колебательных процессов способствует изменению характера износа, что, в свою очередь, влияет на стойкость режущего инструмента.

Расчеты показывают, что в исследуемом диапазоне режимов резания и конструктивных параметров инструмента в результате наличия колебательных процессов скорость резания может изменяться в преде-

лах ± 25%, толщина срезаемого слоя до 50 мкм, а статические углы за точки до 13°.

АрмНИИМаш

Поступило 25.IV.19

Ա. Գ. ԳԱԶԱՐՅԱՆ, Գ. Գ. ՀՈՎԱԿԻՄՅԱՆ

ՖՐԶՆԵՐԻ ՇԱՐԺՄԱՆ ՀԵՏԱԳԾԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ՝ ՏԱՏԱՆՈՂԱԿԱՆ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Բերված է ֆրեզների շարժման հետագծի հաշվարկի մեթոդիկան, հաշվի առնելով կտրման ժամանակ ուղեկցող տատանողական պրոցեսները, որի հիման վրա որոշվում են կտրման իրական արագությունը, կտրող շերտի հաստությունը և կտրող դործիքի սրման ատաղիկ անկյունների փոփոխությունը։

Բացահայտված է տատանողական պրոցեսների պարամետրերի ազդեցության օրինաչափությունը ֆրեզների շարժման հետագծի և նրանց մաշման ընթացքի բնույթի վրա։

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Розенберг А. М.* Динамика фрезерования. М., «Советская наука», 1945.
2. *Этин А. О.* Кинематический анализ методов обработки металлов резанием. М., «Машиностроение», 1964.