

Л и т е р а т у р а

1. К у д и н о в В.А. Динамика станков.-М.:Машиностроение, 1967.
2. Т а ш л и ц к и й Н.И. Первичный источник возбуждения автоколебаний при резании металлов. -Вестник машиностроения, 1960.
3. Ж а р к о в И.Г. Исследование автоколебаний, возникающих при обработке резанием конструкционных материалов: Автореф.дисс.докт. техн.наук. - Куйбышев:КПТИ, 1974.
4. Б у р м и с т р о в Е.В., М а р к у ш и н Е.М., Т а р а с о в А.В. Исследование динамики процесса сверления отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных и титановых сплавов.-Межвуз.сб.: Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов.- Куйбышев: КуАИ, вып.4, 1976.
5. Б у р м и с т р о в Е.В., М а р к у ш и н Е.М., В о р о н о в Е.И. Влияние крутильных колебаний на изменение толщины срезаемого слоя. В сб.:Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов.-Куйбышев: КуАИ, вып.5, 1978.
6. Э л ь я с б е р г М.Е. О независимости границы устойчивости процесса резания от возмущений по следу.- Станки и инструменты, 1976, №11.
7. О т о н, К о н о К. О самовозбуждающихся вибрациях станка или обрабатываемой детали, вызываемых регенеративным влиянием следа и запаздыванием.-Труды американского общества инженеров-механиков "Конструирование и технология машиностроения", Изд.Мир, 1974, №4.
8. Т а р а с о в А.В. Исследование мгновенных скоростей вращения шпинделя и подачи в связи с их влиянием на изменение толщины срезаемого слоя.-В сб.:Обработка высокопрочных сталей и сплавов инструментами из сверхтвердых синтетических материалов.-Куйбышев: КуАИ, 1980.

УДК 621.914.7-752

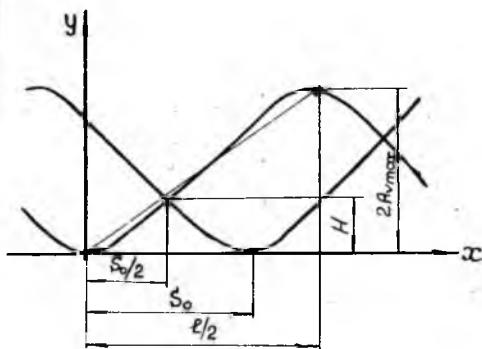
А.Н.Волков, В.И.Стебихов, А.В.Тарасов

ОБРАЗОВАНИЕ ВОЛНИСТОСТИ НА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

При фрезеровании деталей концевыми, цилиндрическими или дисковыми фрезами на обработанной поверхности образуется значительная волнистость. Причины появления волнистости при фрезеровании рассматривались

в работах [1],[2],[3]. В статье развивается представление об образовании волнистости вследствие вибраций, возникающих в процессе резания [3].

Если процесс фрезерования сопровождается вибрациями, происходящими с биениями, когда амплитуда вибраций на протяжении одного оборота фрезы изменяется от максимума до минимума, то высота образующихся волн H в первом приближении может быть определена непосредственно из рассмотрения кинематики процесса (рис.1). Зуб фрезы,



Р и с . 1. Схема образования волнистости на обработанной поверхности с учетом только максимальных амплитуд вибраций за каждый оборот фрезы

находящийся на уровне обработанной поверхности в момент максимальной амплитуды колебаний, делает впадину. Этот процесс повторяется через один оборот фрезы. Соединив точки $y = 0$ ($\tau = 0$) и $y = 2A_{vmax}$ ($\tau = \frac{T}{2}$) прямой линией, можно записать:

$$\frac{H}{\frac{S_0}{2}} = \frac{2A_{vmax}}{\frac{l}{2}},$$

где H - высота волнистости поверхности, мкм; $S_0 = S_z Z$ - подача за один оборот фрезы, мм/об; A_{vmax} - максимальная амплитуда вибраций в направлении, перпендикулярном к обработанной поверхности, мкм;

$l = \frac{\pi D n}{60f}$ - длина волны одного колебания фрезы, мм.

Тогда высота образующейся волнистости определяется по формуле

$$H = \frac{2S_0 A_{vmax}}{l} = \frac{A_{vmax} S_0 f}{500v}, \quad (1)$$

где f - частота вибраций фрезерной оправки, 1/с; v - скорость резания, м/с; D - диаметр фрезы, мм; n - число оборотов фрезы, об/мин.

Рассчитанные по формуле (1) значения волнистости поверхности удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Из формулы, в частности, следует, что высота образующихся волн на обработанной поверхности прямо пропорциональна величине подачи, максимальной амплитуде и частоте вибраций и обратно пропорциональна скорости резания.

Более точная формула для определения высоты волнистости обработанной поверхности может быть получена, если принять в рассмотрение работу всех зубьев фрезы. Траектории движения каждого зуба фрезы с учетом ее вращения сдвинуты относительно друг друга по времени на величину T_B , равную времени поворота фрезы на центральный угол между зубьями:

$$T_B = \frac{1}{f_B} = \frac{60}{nZ},$$

где f_B - частота врезания зубьев, 1/с; Z - число зубьев фрезы.

Поскольку частота автоколебаний f значительно выше частоты врезания зубьев f_B и, следовательно, имеет значительно меньший период

$$T = \frac{1}{f},$$

то за время T_B на соответствующей длине дуги окружности диаметра фрезы D уложится некоторое целое число волн, а в общем случае будет еще и остаток. Последний определяет сдвиг фаз траекторий колебательных движений, описываемых каждым зубом фрезы. Таким образом, сдвиг фаз по времени может быть определен из выражения

$$\Delta T = T_B - Tq,$$

где $q = 0, 1, 2, \dots$ - целое число волн автоколебаний на дуге между двумя соседними зубьями фрезы.

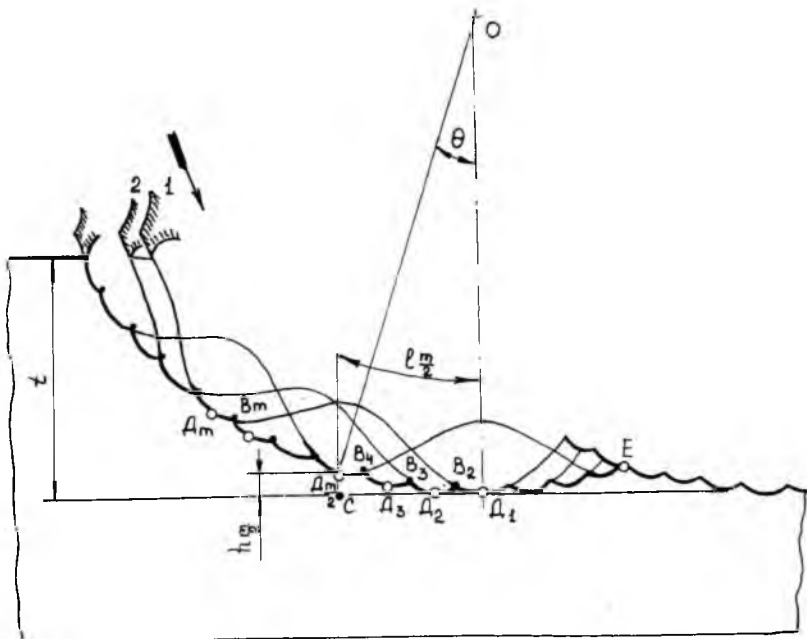
Величина угла сдвига фаз колебаний Y_K определяется по формуле

$$Y_K = 2\pi \frac{\Delta T}{T},$$

или

$$Y_K = 2\pi \left(\frac{f}{f_B} - q \right). \quad (2)$$

Колебательное движение фрезы в процессе резания одного зуба образует на дуге резания волнообразный след, при этом точка пересечения перпендикуляра из центра фрезы к обработанной поверхности может оказаться как на выступе, так и во впадине или другой точке волнообразного следа движения фрезы. Вследствие сдвига фаз колебаний волнообразные следы от последующих зубьев будут смещаться по дуге резания, и при работе какого-либо зуба (для простоты рассуждений обозначим его индексом 1, рис.2) точка пересечения перпендикуляра из центра фрезы к обработанной поверхности окажется во впадине (точка D_1), т.е. зуб 1 сделает выхват на обработанной поверхности. Впадины, создаваемые каждым последующим зубом, вследствие сдвига их траекторий колебаний при $Y_K \neq 0$ будут располагаться не на обработанной поверхности, а на дуге резания в точках D_2, D_3, \dots . Создав последнюю



Р и с. 2. Схема образования волнистости на обработанной поверхности с учетом работы всех зубьев фрезы

впадину, каждый зуб фрезы выйдет из контакта с поверхностью резания в точках B_2, B_3, \dots , расположенных на дуге резания; при этом металл на участке $D_1, B_2, D_2, B_3, D_3 \dots$ окажется несрезанным, а поверхность $D_1, B_2, D_2 \dots$ станет частью профиля обработанной поверхности.

Траектория колебательного движения некоторого зуба m относительно траектории зуба 1 окажется сдвинутой по фазе на угол 2π , и режущая кромка зуба m создаст впадину в точке D_m , а затем еще в точке D_1 или в ее непосредственной близости (если φ_k не кратно 2π), т.е. картина образования впадин и выступов повторится.

При последующем колебательном движении каждый зуб, начиная с $\frac{m}{2}$ до m , вновь войдет в контакт с уже обработанной поверхностью и срежет (или сгладит, если фреза притуплена) часть металла на участке $D_1 E$.

Таким образом, после работы каждого m зубьев на обработанной поверхности образуются впадины, между которыми располагаются выступы металла, не срезанного вследствие колебаний инструмента и сдвига траекто-

рий движения его зубьев.

Огибающая $D_1 D_2$ представляет собой часть окружности с диаметром фрезы D , поэтому

$$h_{\frac{m}{2}} = 500D(1 - \cos \theta), \quad (3)$$

где

$$\theta = \frac{2\ell_{\frac{m}{2}}}{D};$$

$$\ell_{\frac{m}{2}} = \frac{\pi D n}{120 f}.$$

После подстановки в выражение (3) значения θ получаем

$$h_{\frac{m}{2}} = 500D \left(1 - \cos \frac{\pi n}{60 f}\right).$$

За время работы $\frac{m}{2}$ зубьев перемещение детали относительно инструмента составит $S_z \frac{m}{2}$, точка D_1 будет находиться (с учетом перемещения детали) от точки C на расстоянии $S_z \frac{m}{2} + \ell_{m/2}$.

Действительная высота волнистости на обработанной поверхности, образующейся за счет сдвига фаз, будет соответствовать расстоянию $S_z \frac{m}{2}$ от точки D_1 и определяться по формуле

$$H_{y_k} = h_{\frac{m}{2}} \frac{S_z \frac{m}{2}}{S_z \frac{m}{2} + \ell_{\frac{m}{2}}},$$

или

$$H_{y_k} = 500D \left(1 - \cos \frac{\pi n}{60 f}\right) \frac{S_z}{S_z + \frac{Dn}{120 f}}. \quad (5)$$

Подставляя в формулу (5) значение y_k , получим:

$$H_{y_k} = 500D \left(1 - \cos \frac{\pi n}{60 f}\right) \frac{S_z}{S_z + \frac{\pi D n (f - f_B q)}{60 f f_B}}. \quad (6)$$

Шаг волнистости от сдвига фаз определяется по формуле

$$S_{y_k} = S_z m = S_z \frac{2\pi}{y_k} = \frac{S_z f_B q}{f - f_B q}, \quad (7)$$

в общем случае не совпадает с шагом за один оборот фрезы. Расчеты по формуле (6) показали, что величина H_{y_k} в зависимости от сдвига фаз колебаний, режима резания и жесткости упругой системы СПИД составляет 50-75% от высоты волнистости, замеренной на обработанных бразцах.

При работе с вибрациями, происходящими с биениями, высота волнистости может определяться как разность между максимальной и минимальной амплитудами колебаний [3]:

$$H_{\delta} = \Delta A_{\nu} = A_{\nu \max} - A_{\nu \min} \quad (8)$$

Исследование вибраций и волнистости, образующейся на обработанной поверхности при работе концевыми фрезами, показало, что период биений совпадает с периодом сдвига фаз на угол 2π , и, следовательно, шаг волны на обработанной поверхности вследствие биений будет равен шагу волны от сдвига фаз. Эти волны будут совпадать по фазе и увеличивать высоту волнистости, если амплитуда вибраций будет максимальной при резании зуба 1, или волны будут сдвинуты друг относительно друга на угол φ_{τ} . Максимальная амплитуда вибраций, очевидно, будет наблюдаться при резании зуба в том случае, если направление силы при врезании совпадает с направлением вибрационного движения инструмента. Если при этом на дуге резания уложится целое число вибрационных волн k , то впадина, полученная на обработанной поверхности при максимальной амплитуде вибраций, совпадет со впадиной в точке D_1 и увеличит высоту волнистости обработанной поверхности. Если на дуге резания уложится смешанное число вибрационных волн η , то величина угла сдвига φ_{τ} может быть определена по формуле

$$\varphi_{\tau} = 2\pi(\eta - k) \text{ рад.} \quad (9)$$

Дуга резания определяется по формуле

$$t_p = \frac{D}{2} a z c c \cos \left(1 - \frac{2t}{D}\right),$$

где t - глубина фрезерования, мм.

С другой стороны,

$$t_p = 10^3 \eta T v = \frac{2}{f} \frac{\pi D n}{60}$$

Откуда

$$\eta = \frac{30 f a z c c \cos \left(1 - \frac{2t}{D}\right)}{\pi n}$$

$$\text{и } \varphi_{\tau} = 2\pi \left[\frac{30 f a z c c \cos \left(1 - \frac{2t}{D}\right)}{\pi n} - k \right], \quad (10)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$

С учетом перечисленных факторов формула для вычисления волнистости обработанной поверхности запишется в виде

$$H = 500D(1 - \cos \frac{\pi n}{60f}) \frac{S_z}{S_z + \frac{\pi D n (f - f_B \varphi)}{60f f_B}} +$$

$$+ \Delta A_{\nu} \cos 2\pi \left[\frac{30f a z c \cos(1 - \frac{2t}{D})}{\pi n} - k \right].$$

(II)

Шаг волнистости с учетом биения зубьев фрезы будет определяться по формулам:

при z , не кратном m ,

$$S_B = S_z z m;$$

при z , кратном m ,

$$S_B = S_z m;$$

при z , равном m ,

$$S_B = S_z z.$$

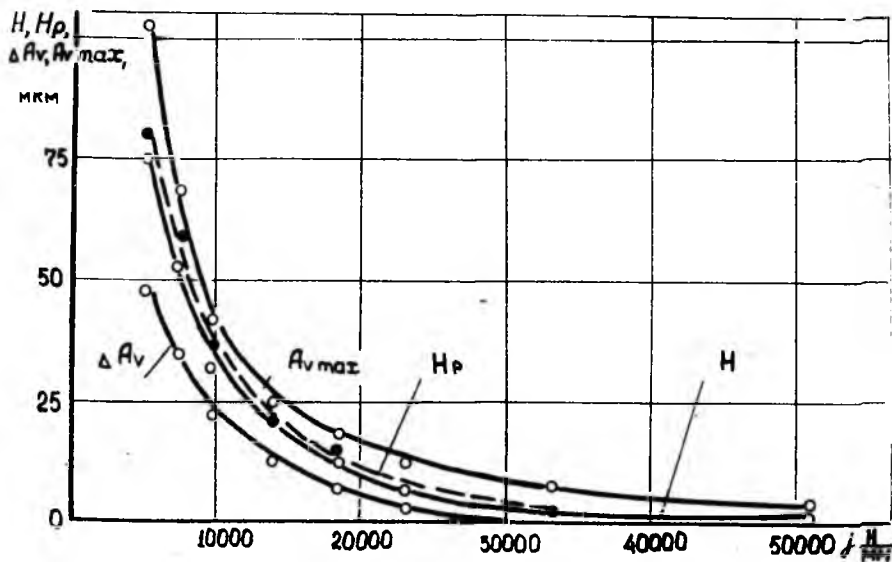
Экспериментальная проверка полученных формул проводилась при обработке титановых сплавов концевыми, дисковыми, пазовыми и цилиндрическими фрезами в широком диапазоне изменения параметров режима резания, числа зубьев фрезы и жесткости упругой системы СПИД. В процессе резания бесконтактным способом [4] на пленку регистрировались поперечные колебания фрезы как доминирующей колебательной системы. Волнистость обработанной поверхности определялась по профилограммам, полученным на профилографе-профилометре мод.20I завода "Калибр". Расхождение между расчетными значениями волнистости, определенными по формуле (II), и полученными экспериментально, не превышает 10%. Иллюстрацией к сказанному являются графики зависимости волнистости обработанной поверхности от жесткости упругой системы СПИД и подачи, представленные на рис.3,4.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

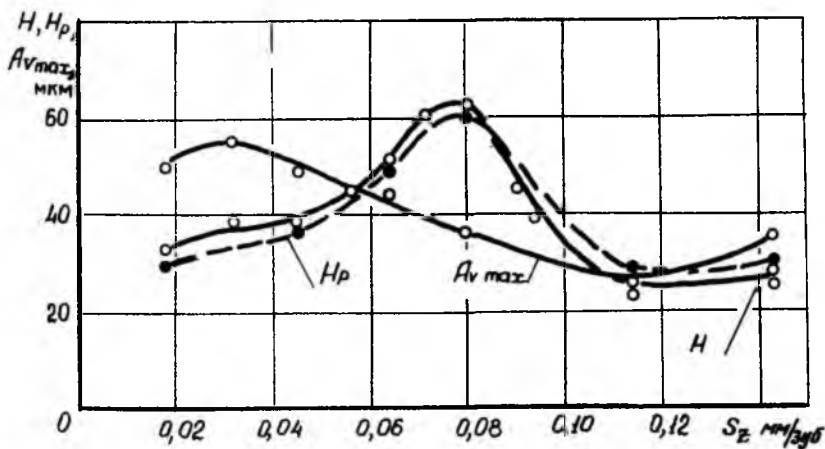
1. Волнистость обработанной поверхности при фрезеровании образуется вследствие вибраций инструмента в процессе резания. При этом решающими факторами являются сдвиг фаз траекторий на поверхности резания, оставляемых каждым зубом фрезы, и биения вибраций.

2. Значительного снижения волнистости можно достичь за счет соответствующего изменения угла сдвига фаз путем:

а) незначительного изменения жесткости системы инструмента, ведущего к изменению f ;



Р и с. 3. Зависимость волнистости обработанной поверхности от жесткости упругой системы СПИД: H - экспериментальная высота волнистости; H_p - расчетная высота волнистости; $A_v \max$ - максимальная амплитуда вибраций в направлении, перпендикулярном к обработанной поверхности; ΔA_v - величина биения вибраций



Р и с. 4. Зависимость волнистости обработанной поверхности от величины подачи при концевом фрезеровании титанового сплава (обозначения те же, что и на рис.3)

- б) изменения частоты врезания зубьев f_B за счет изменения числа зубьев инструмента или числа его оборотов;
- в) создания переменного угла сдвига фаз неравномерным расположением зубьев по окружности фрезы.

Л и т е р а т у р а

1. Р е з н и к о в Н.И. Учение о резании металлов.-М.:Машгиз, 1947.
2. Б е л и н и ч е р И.Ш. Улучшение качества поверхности при фрезеровании.-М.:Машгиз, 1951.
3. Ж а р к о в И.Г., В о л к о в А.Н. Влияние вибраций на волнистость поверхности при фрезеровании пазов.-Станки и инструменты, 1968, № 1.
4. Ж а р к о в И.Г., Ш а р к о в Н.Ф., В о л к о в А.Н. Аппаратура и методика исследования вибраций бесконтактным методом при фрезеровании.-Известия вузов. Сер. Машиностроение.-М.:МВТУ, 1970, № 1.

УДК 621.91.015:534.83.001

Г.Т.А в д о н и н

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ЧИСТОВОМ ТОЧЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Обработка резанием существенно изменяет эксплуатационные свойства деталей за счет формирования определенного качества поверхностного слоя: шероховатости, волнистости, наклепа и остаточных напряжений. Особенно это проявляется в процессе чистового точения труднообрабатываемых материалов при наличии вибраций технологической системы. В связи с этим обработка резанием может рассматриваться не только как способ получения деталей определенной формы и размеров, но и как эффективный метод управления их эксплуатационными характеристиками [1].

Исследование износа деталей авиационного двигателя показало почти линейную зависимость износа деталей от высоты волнистости. Интенсивный износ происходит в некотором интервале шагов волн. Так, при высоте волн, равной 24 мкм, износ сопряженных деталей интенсивен до величины шага волн, не превышающей 10 мм. При дальнейшем увеличении шага волн, по-видимому, в связи с одновременным ростом радиуса при