

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

Якимов А.В., докт. техн. наук, проф.

(Одесский национальный политехнический университет)

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, проф.

(Харьковский национальный экономический университет)

This paper presents a new look at the conditions of appearance and the way the mouth injury-damped oscillations in cutting and polishing materials.

Возникающие при механической обработке незатухающие колебания отрицательно влияют на качество и точность обрабатываемых поверхностей. Поэтому поиск причин возникновения и путей устранения колебаний имеет важное теоретическое и практическое значение. Несмотря на большое количество работ в этом направлении, вопрос полностью не решен, что требует проведения

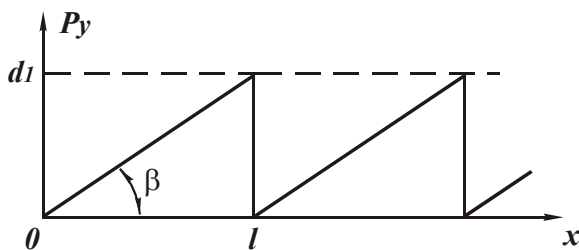


Рис. 1. Изменение параметров d_1 и P_y от времени τ .

дальнейших исследований. Поэтому в настоящей работе предложен новый взгляд на условия возникновения незатухающих колебаний при резании и шлифовании материалов.

Возбуждение незатухающих колебаний при резании может произойти вследствие периодичности процесса стружкообразования, когда толщина

упруго-пластически деформируемого слоя материала d_1 и радиальная составляющая силы резания P_y изменяются по закону, показанному на рис. 1. Максимальное значение P_y достигается в момент отделения элементарного объема материала по условной плоскости сдвига, расположенной под углом β к направлению движения инструмента, и равно

$$P_y = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot S = \frac{HV}{K_{рез}} \cdot S', \quad (1)$$

где $\sigma = 4 \cdot \tau_{сдв} / K_{рез}$ — условное напряжение резания, Н/м²; $K_{рез} = ctg(\psi - \gamma)$ — коэффициент резания; γ — передний угол инструмента; ψ — условный угол трения на передней поверхности инструмента; $S = a \cdot B$ — площадь поперечного сечения среза, м²; a — толщина среза, м; B — ширина резания, м; HV , $\tau_{сдв}$ — соответственно твердость (по Виккерсу) и предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м²; $S' = d \cdot B$ — площадь поперечного сечения, подвергающегося упруго-пластическому деформированию (смятию), м².

После преобразований зависимости (1), имеем

$$d_1 = \frac{4 \cdot \tau_{сдв} \cdot tg(\psi - \gamma) \cdot a}{HV}. \quad (2)$$

Толщина упруго-пластически деформируемого слоя материала d_1 тем больше, чем больше толщина среза a , $tg(\psi - \gamma)$ и $\tau_{сдв}/HV$. На участке $0 \dots l$ (рис. 1) радиальную составляющую силы резания P_y представим в виде

$$P_y = \frac{HV}{K_{рез}} \cdot S', \quad (3)$$

где $S' = tg\beta \cdot B \cdot x$ – текущее значение площади S' ; $x = V \cdot \tau$ – длина пути, м; V – скорость резания, м/с; τ – время, с.

Параметр $tg\beta$ выражается через известный параметр $tg2\beta = K_{рез}$ с помощью тригонометрической зависимости

$$tg2\beta = \frac{2 \cdot tg\beta}{1 - tg^2\beta}, \quad \text{откуда} \quad tg\beta = \left(\frac{1}{1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}} \right). \quad (4)$$

Колебание одномассовой системы под действием радиальной составляющей силы резания P_y в направлении оси OY опишется уравнением

$$m \cdot \ddot{y} + c \cdot \dot{y} = P_y \quad \text{или} \quad \ddot{y} + k^2 \cdot y = \frac{HV}{K_{рез} \cdot m} \cdot tg\beta \cdot B \cdot V \cdot \tau, \quad (5)$$

где $k^2 = c/m$; k – собственная частота системы, с⁻¹; c – приведенная жесткость системы, Н/м; m – приведенная масса системы, кг.

Частное решение уравнения (5):

$$y = A \cdot \tau, \quad (6)$$

где $A = \frac{HV \cdot tg\beta \cdot B \cdot V}{c \cdot K_{рез}}$.

Общее решение уравнения (5):

$$y = B_1 \cdot \sin k\tau + B_2 \cdot \cos k\tau + A \cdot \tau. \quad (7)$$

При нулевых начальных условиях, т.е. $y(0)=0$ и $\dot{y}(0)=0$ зависимость (7) примет вид

$$y = -\frac{HV \cdot tg\beta \cdot B \cdot V}{c \cdot K_{рез}} \cdot \sin k\tau + \frac{HV \cdot tg\beta \cdot B \cdot V}{c \cdot K_{рез}} \cdot \tau. \quad (8)$$

Таким образом показано, что увеличивающаяся во времени сила P_y возбуждает колебания массы m с частотой, равной собственной частоте системы k .

Считая, что сила P_y носит периодический характер, определим амплитуду установившихся колебаний, используя два условия совместности

$$\begin{cases} y(0) = y(T), \\ \dot{y}(0) = \dot{y}(T), \end{cases} \quad (9)$$

где $T = l/V$ – период действия возмущающей силы (рис. 1).

Подчиняя зависимость (7) условиям (9), имеем

$$y = \frac{A \cdot T}{2} \cdot ctg \frac{kT}{2} \cdot \sin k\tau + \frac{A \cdot T}{2} \cdot \cos k\tau + A \cdot \tau \quad \text{или}$$

$$y = A \cdot \left[\frac{T}{2 \sin \frac{kT}{2}} \cdot \sin(k\tau + \phi) + \tau \right], \quad (10)$$

где $\phi = -kT/2$.

С учетом $T = 2\pi / \omega$ (где ω – частота периодических изменений силы P_y) при $k / \omega = n$ (где $n = 1; 2; 3; \dots$ – целое число) $\sin kT / 2 = 0$, т.е. в системе наступает резонанс. Имеет место бесконечное множество резонансных состояний, т.к. n – неограниченно. Очевидно, в силу рассеивания энергии резонансы при $n > 1$ проявляться практически не будут. Основное резонансное состояние будет наблюдаться при $n = 1$ ($\omega = k$). При этом определяющим в (10) является первое слагаемое, которое принимает наибольшее значение при $\sin(kt + \varphi) = 1$, т.е.

$$y_{max} = A \cdot \frac{T}{2 \sin \frac{kT}{2}}. \quad (11)$$

Параметр T с учетом зависимости (2) описывается

$$T = \frac{4 \cdot \tau_{сдв} \cdot a}{HV \cdot V} \cdot \frac{(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2})}{K_{рез}}. \quad (12)$$

Соответственно частота ω равна

$$\omega = \frac{\pi \cdot HV \cdot V}{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot a} \cdot \frac{K_{рез}}{(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2})}. \quad (13)$$

С увеличением скорости резания V частота увеличивается ω и при $\omega = k$ наступает резонанс. Следовательно, с увеличением V перемещение y_{max} по (11) первоначально будет возрастать, затем уменьшаться, проходя точку максимума (с учетом диссипативных сил при $\omega = k$ перемещение y_{max} будет принимать конечное значение).

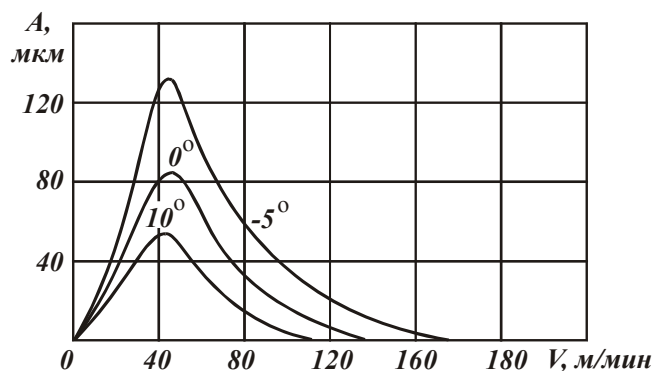


Рис. 2. Влияние скорости резания и переднего угла реза γ на амплитуду колебаний при точении (сталь 40X, $\varphi = 30^\circ$, $t = 2$ мм, $S = 0,25$ мм/об).

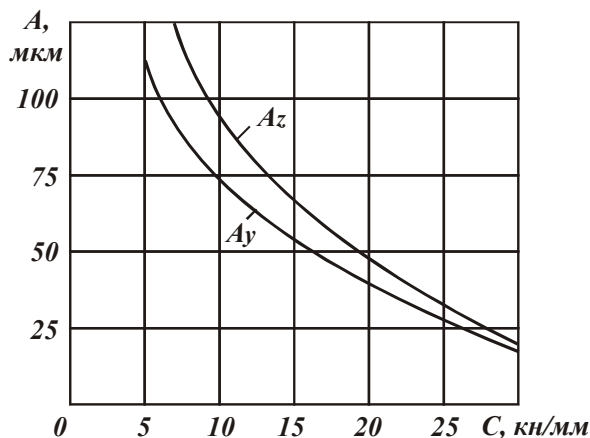


Рис. 3. Зависимость амплитуды колебаний от жесткости системы при точении стали X15H5Д2Т.

Зависимость (11) с учетом (12) и (6) опишется

$$y_{max} = \frac{2 \cdot B \cdot \tau_{сдв} \cdot a}{c} \cdot \text{tg}^2(\psi - \gamma) \cdot \frac{1}{\sin \frac{kT}{2}}. \quad (14)$$

С увеличением переднего угла инструмента γ , приведенной жесткости c и уменьшением параметров B и $\tau_{сдв}$ при $\omega = k$ перемещение y_{max} будет уменьшаться.

С увеличением толщины среза a в соответствии с зависимостью (13) частота ω уменьшается от ∞ до 0. Следовательно, возможно выполнение условия резонанса ($\omega = k$).

Аналогично скорости резания, с увеличением a перемещение y_{max} первоначально будет возрастать, затем уменьшаться. Входящий в числитель зависимости (14) параметр a усиливает рост y_{max} .

Механические характеристики обрабатываемого материала, входящие в (13) в виде соотношения $HV/\tau_{cдв}$, и параметр $K_{рез}$ на частоту ω влияют несущественно. Однако с увеличением $\tau_{cдв}$ и угла трения ψ перемещение y_{max} значительно возрастает. Таким образом показано доминирующее влияние физических параметров T и ω на интенсивность колебаний. Уменьшить амплитуду колебаний можно исключением резонансного состояния системы путем выбора соотношений параметров обработки в соответствии с зависимостями (12) и

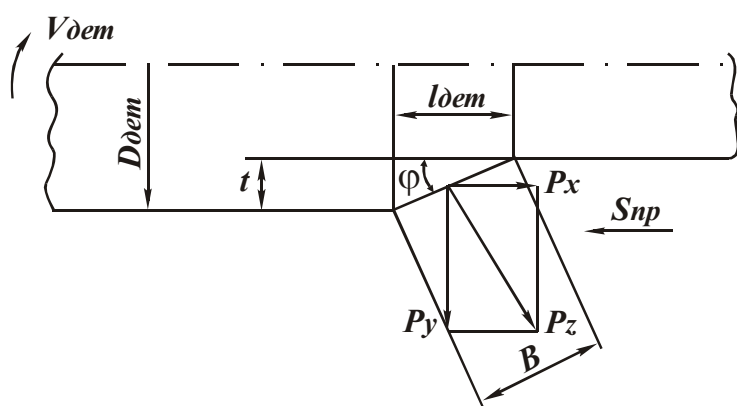


Рис. 4. Расчетная схема продольного точения.

(13).

Теоретические данные согласуются с экспериментальными, приведенными в работе [1], рис. 2. С увеличением скорости резания (при постоянной толщине среза) амплитуда колебаний в некотором интервале возрастает, а затем уменьшается. С увеличением жесткости системы s амплитуда колебаний уменьшается,

рис. 3 [2].

При продольном точении ширину резания B можно представить $B=t/\sin\phi$ (рис.4), где t – глубина резания, ϕ – угол резца в плане. Тогда с увеличением t амплитуда колебаний y_{max} исходя из (14) возрастает, а с увеличением угла резца в плане ϕ – уменьшается.

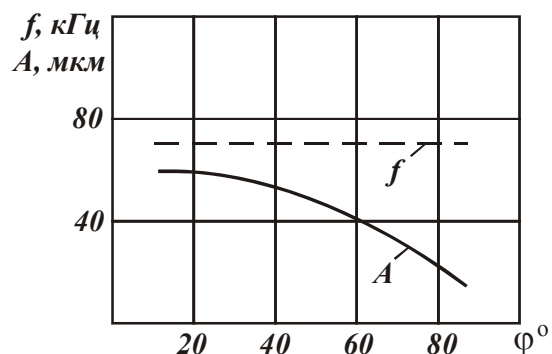


Рис. 5. Влияние главного угла в плане ϕ на частоту f и амплитуду A колебаний при точении (сталь 40X, $\gamma = 8^\circ$, $t=2$ мм, $S=0,25$ мм/об, $V=45$ м/мин).

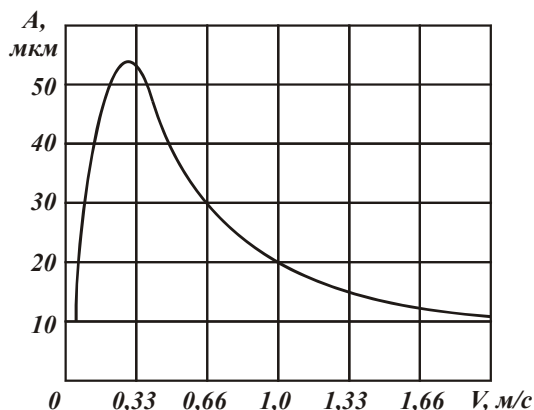


Рис. 6. Зависимость амплитуды колебаний от скорости резания при радиальном точении лопаточным резцом из ВК8 ($\gamma = 0^\circ$, $\alpha=12^\circ$, $b=4$ мм, $S=0,15$ мм/об, сталь X15H5Д2Т).

Приведенные экспериментальные данные, рис. 5 [1] и рис. 6 [2], для продольного течения согласуются с теоретическими результатами.

Рассмотрим условия возникновения вынужденных колебаний при шлифовании материалов. При шлифовании, как и при тонком точении, параметр

$K_{рез}$ описывается зависимостью $K_{рез} = 2 \cdot \beta = 3 \sqrt{\frac{2 \cdot a \cdot \tau_{сдв}}{HV \cdot \rho}}$. Тогда зависимость

(14) примет вид

$$y_{max} = \frac{2 \cdot B}{c} \cdot 3 \sqrt{\left(\frac{HV \cdot \rho}{2}\right)} \cdot \tau_{сдв} \cdot a \cdot \frac{1}{\sin \frac{kT}{2}}. \quad (15)$$

С учетом $K_{рез} < 1$ и $V = V_{кр}$ зависимость (13) видоизменится

$$\omega = \frac{\pi \cdot V_{кр}}{4} \cdot 3 \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \left(\frac{HV}{\tau_{сдв} \cdot a}\right)^2}. \quad (16)$$

На частоту колебаний ω существенное влияния оказывают три параметра: $V_{кр}$, a и ρ . Поэтому выполнение условия $\omega = k$ возможно при изменении этих трех параметров. Уменьшить амплитуду колебаний y_{max} можно как исключени-

ем резонанса $\left|\sin \frac{kT}{2}\right| > 1$, так и уменьшением параметров B , ρ , a (увеличением

c). Очевидно, наиболее эффективно уменьшить радиус округления режущего зерна ρ путем применения правки круга или режима самозатачивания, т.к. это не требует снижения производительности обработки. Толщину среза отдельным зерном $a = a_z$ при условии $a_z < \rho$ можно представить в виде [3]:

$$a_z = \frac{315 \cdot \pi \cdot \bar{x}^{-3} \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \left(\frac{2}{D_{кр}} + \frac{2}{D_{дет}}\right)}}{m \cdot V_{кр} \cdot \rho^2}, \quad (17)$$

где m , \bar{x} – объемная концентрация и зернистость круга (в м); $V_{дет}$ – скорость детали, м/с; $D_{кр}$, $D_{дет}$ – диаметры круга и детали, м; t – глубина шлифования, м.

После подстановки (17) в (15) и (16), имеем

$$y_{max} = \frac{2 \cdot B}{c} \cdot 3 \sqrt{\frac{80 \cdot \pi \cdot \bar{x}^{-3} \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \left(\frac{2}{D_{кр}} + \frac{2}{D_{дет}}\right)} \cdot HV^2 \cdot \tau_{сдв}}{m \cdot V_{кр}}} \cdot \frac{1}{\sin kT/2}, \quad (18)$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot V_{кр}}{4} \cdot 3 \sqrt{2 \cdot \rho^3 \cdot \frac{m \cdot V_{кр} \cdot HV}{315 \cdot \pi \cdot \bar{x}^{-3} \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \left(\frac{1}{D_{кр}} + \frac{1}{D_{дет}}\right)} \cdot \tau_{сдв}}}. \quad (19)$$

Основное влияние на частоту ω оказывают скорость круга $V_{кр}$, радиус

округления зерна ρ и зернистость круга \bar{x} . С увеличением V_{kp} , ρ и уменьшением \bar{x} частота ω увеличивается и возможно выполнение условия резонанса $k=\omega$. Следовательно, для устранения колебаний необходимо в первую очередь управлять этими тремя параметрами.

Частота ω также возрастает с увеличением концентрации круга m и уменьшением скорости детали $V_{дет}$ и глубины шлифования t . Учитывая определяющее влияние на y_{max} множителя $\sin kT / 2$, в связи с резонансным состоянием системы, с изменением параметров V_{kp} , ρ , \bar{x} , m_n , $V_{дет}$, t амплитуда колебаний может изменяться по экстремальной зависимости, проходя точку максимума. В ограниченных пределах изменения этих параметров возможен только рост или падение y_{max} .

Если $|\sin kT / 2| > 0$, то амплитуда колебаний y_{max} , будет увеличиваться с увеличением B , \bar{x} , $V_{дет}$, t , HV , $\tau_{сдв}$ и уменьшением c , m , V_{kp} . Теоретические данные согласуются с экспериментальными данными Л.Н. Филимонова [4], Г.Б. Лурье [5] и других исследователей.

Таким образом показано, что возбуждение незатухающих колебаний при резании может происходить от периодически изменяющейся силы резания, обусловленной периодичностью процесса стружкообразования.

Список литературы: 1. Кучма Л.К. Экспериментальные исследования вибраций при резании на токарном станке. – В кн. «Новые исследования в области резания металлов». – М.–Л.: Машгиз, 1948. – С. 100-128. 2. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отдел., 1986. –184 с. 3. Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов О.О. Високопродуктивне шліфування: навч. посібник. – К.: 1СДО, 1995. –180 с. 4. Филимонов Л.Н. Висококоростне шліфування. – Л.: Машиностроение, 1979. – 245 с. 5. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с.