

УДК621.92.01

В.М. Тонконогий, д-р техн. наук, А.А. Якимов, д-р техн. наук,  
Л.В. Бовнегра, канд. техн. наук, Одесса, Украина

## **ДИНАМИКА ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ**

*Виявлено умови виникнення в пружній системі шліфувального верстата ударного і параметричного резонансів при обробці абразивними кругами з переривчастою робочою поверхнею. Запропоновано шляхи запобігання появи в пружній системі верстата коливань, здатних призвести до погіршення якості поверхневого шару обробленої деталі при переривчастому шліфуванні.*

*Выявлены условия возникновения в упругой системе шлифовального станка ударного и параметрического резонансов при обработке абразивными кругами с прерывистой рабочей поверхностью. Предложены пути предотвращения появления в упругой системе станка колебаний, способных привести к ухудшению качества поверхностного слоя обработанной детали при прерывистом шлифовании.*

*The conditions of occurrence in the elastic system of the grinding machine and the impact of parametric resonance in the processing of abrasive wheels, intermittent work surface. Ways to prevent an elastic system of the machine vibrations that could lead to Uhud, in the quality of the surface layer treated with intermittent grinding parts.*

Постановка проблеми. Колебания, возникающие в процессе прерывистого шлифования, влияют на точность и качество обрабатываемой поверхности. В процессе шлифования кругами с прерывистой рабочей поверхностью могут возникнуть вынужденные и параметрические колебания. Вопросам динамики прерывистого резания посвящены работы [1-6]. Большинство работ, в которых исследуется динамика прерывистого резания, посвящены лезвийной обработке. Вопросы динамики прерывистого шлифования в технической литературе овящены недостаточно.

Основные материалы исследования. При шлифовании прерывистыми кругами сила  $P_y(\tau)$  периодически изменяется, рис. 1.

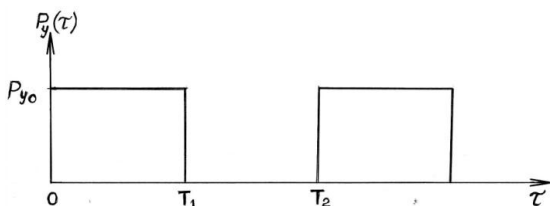


Рисунок 1 – Изменение силы  $P_y(\tau)$  от времени обработки  $\tau$

В период времени  $0..T_1$  колебания массы  $m$  описываются дифференциальным уравнением

$$m \cdot \ddot{y}_1 + c_y \cdot y_1 = P_{y0}, \quad (1)$$

а в период времени  $T_1..T_2$  дифференциальным уравнением

$$m \cdot \ddot{y}_1 + c_y \cdot y_1 = 0. \quad (2)$$

Общие решения двух уравнений

$$y_1 = A \cdot \sin k\tau + B \cdot \cos k\tau + y_{cm}, \quad (3)$$

$$y_2 = C \cdot \sin k\tau + D \cdot \cos k\tau, \quad (4)$$

где  $y_{cm}$  – статическое перемещение массы  $m$  от действия силы  $P_{y0}$ .

Постоянные  $A$  и  $B$  определяются из начальных условий

$$\begin{cases} y_1(0) = 0, \\ \dot{y}_1(0) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

а постоянные  $C$  и  $D$  – из условий совместности

$$\begin{cases} y_1(T_1) = y_2(T_1), \\ \dot{y}_1(T_1) = \dot{y}_2(T_1). \end{cases} \quad (6)$$

После преобразований получено

$$y_1 = y_{cm}(1 - \cos k\tau), \quad (7)$$

$$y_2 = y_{cm}[\sin kT_1 \cdot \sin k\tau + (\cos kT_1 - 1) \cdot \cos k\tau]. \quad (8)$$

При  $\tau = T_2$  перемещение  $y_2$  равно

$$y_2 = 2 \cdot y_{cm} \cdot \sin \frac{kT_1}{2} \cdot \sin k \left( T_2 - \frac{T_1}{2} \right). \quad (9)$$

В зависимости от  $T_1$  и  $T_2$  величина  $y_2$  может изменяться в пределах  $-2y_{cm}..2y_{cm}$ . При  $|y_2| > 0$  начальные условия для второго импульса силы  $P_{y0}$  не будут нулевыми. Следовательно, амплитуда колебаний с каждым

последующим импульсом будет возрастать, приводя систему в резонансное состояние. Исключить рост амплитуды колебаний во времени, исходя из (9), можно выполнением условия  $y_2(\tau = T_2) = 0$ , т.е.

$$\begin{cases} \sin \frac{kT_1}{2} = 0, \\ \sin k \left( T_2 - \frac{T_1}{2} \right) = 0, \end{cases} \quad (10)$$

Откуда

$$\begin{cases} T_1 = \frac{2 \cdot n \cdot \pi}{k}, \\ T_2 - \frac{T_1}{2} = \frac{2 \cdot n \cdot \pi}{k}, \end{cases} \quad (11)$$

где  $n$  – целое число.

В этом случае масса  $m$  будет совершать периодические установившиеся во времени колебания. Следовательно, уйти от резонанса можно путем регулирования параметрами  $T_1$  и  $T_2$ , изменяя конструктивные параметры инструментов и режимов резания. Данное решение получено для нулевых начальных условий. В общем случае установившиеся периодические колебания массы  $m$  описываются зависимостями (3) и (4) с учетом 4-х условий совместимости

$$\begin{cases} y_1(0) = y_2(T_1), \\ \dot{y}_1(0) = \dot{y}_2(T_1), \\ y_1(T_1) = y_2(T_2), \\ \dot{y}_1(T_1) = \dot{y}_2(T_2). \end{cases} \quad (12)$$

Определяя постоянные  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  с учетом (12), получено

$$y_1 = y_{cm} \cdot \left[ 1 + \frac{\sin \frac{k(T_2 - T_1)}{2}}{\sin \frac{kT_2}{2}} \cdot \sin(k\tau + \varphi) \right]. \quad (13)$$

Максимальное значение  $y_1$  равно при  $\sin(k\tau + \varphi) = 1$

$$y_{1\max} = y_{cm} \cdot \left[ 1 + \frac{\sin \frac{k(T_2 - T_1)}{2}}{\sin \frac{kT_2}{2}} \right]. \quad (14)$$

При  $\sin \frac{kT_2}{2} = 0$  амплитуда колебаний  $y_{\max}$  принимает бесконечно большое значение, т.е. в системе наступает резонанс. Условие резонанса (с учетом  $T_2 = \frac{2\pi}{\omega}$ , где  $\omega$  – частота следования импульсов)

$$\frac{k}{\omega} = n, \quad (15)$$

где  $n = 1; 2; 3; \dots$  – целое число.

Как видим, имеет место бесконечное множество резонансов: при значениях  $\omega$ , кратных собственной частоте системы  $k$ . Очевидно, при  $\omega < k$  резонансные состояния системы не опасны в силу рассеивания энергии диссипативными силами, которые в данном решении не учитывались. Резонансы будут в максимальной степени проявляться при  $\omega \rightarrow k$ , т.е. при  $n \rightarrow 1$ . Исключить резонансы можно регулированием соотношений периодов времени  $T_1$  и  $T_2$ . При их кратности, т.е. при  $T_2 = n_i \cdot T_1$ , где  $n_i$  – целое число ( $n_i > 1$ ), будет выполняться условие

$$\left| \sin \frac{k(T_2 - T_1)}{2} \right| = \left| \sin \frac{kT_2}{2} \right|, \quad (16)$$

которое исключает из знаменателя множитель  $\sin \frac{kT_2}{2}$  и тем самым ограничивает величину  $y_{\max}$ .

Теперь рассмотрим условия возникновения в упругой системе шлифовального станка параметрического резонанса.

Периодичность изменения возбуждающей силы в условиях прерывистого шлифования приводит к изменению жесткости упругой системы по времени. Изменение жесткости  $C$  происходит по периодическому кусочно-постоянному закону. При контакте  $\tau_1$  режущего

выступа с обрабатываемой деталью жесткость упругой системы равна  $C_o + C_o \cdot \left( \frac{t_l}{t_\phi} - 1 \right) / 2$ , а во время прекращения процесса резания  $C_o - C_o \cdot \left( \frac{t_l}{t_\phi} - 1 \right) / 2$  (где  $t_l, t_\phi$  – глубина резания, установленная по лимбу и фактическая глубина резания соответственно (рис. 2)).

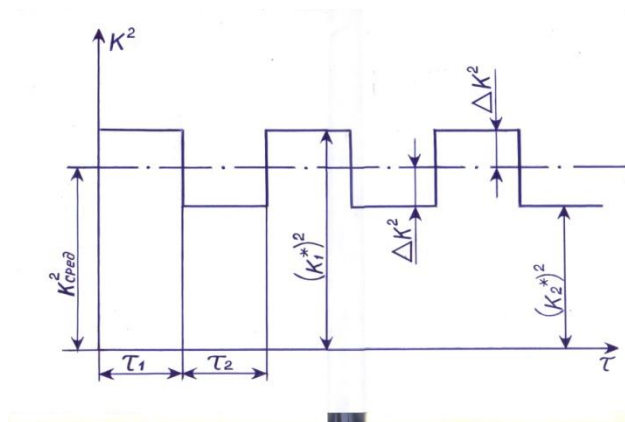


Рисунок 2 – Смена коэффициента  $k^2$  при прерывистом шлифовании

Дифференциальное уравнение движения одномассовой системы по оси координат  $X$ , направленной перпендикулярно к обрабатываемой поверхности, имеет вид:

$$\ddot{x} + 2 \cdot h \cdot \dot{x} + k_{\text{сред}}^2 \cdot (1 \pm \mu) \cdot x = 0, \quad (17)$$

где  $\mu = \frac{\Delta k^2}{k_{\text{сред}}^2}$ ;  $h$  – величина, характеризующая затухания колебаний во

времени,  $1/\text{с}$ ;  $\Delta k^2 = \frac{k_o}{2 \cdot m} = \frac{C_o \cdot \left( \frac{t_l}{t_\phi} - 1 \right)}{2 \cdot m}$ ;  $k_o, C_o$  – жесткость резания и

приведенная жесткость упругой системы соответственно Н/м;  $k_{\text{сред}} = \sqrt{\frac{C_o}{m}}$  –

среднее значение собственной частоты,  $1/c$ ;  $m$  – приведенная масса круга,  $(H \cdot \text{сек}^2)/m$ .

Решения дифференциальных уравнений (17) с постоянными коэффициентами принимают вид:

$$x_1 = C_1 \cdot e^{-h\tau} \cdot \sin k_1 \cdot \tau + D_1 \cdot e^{-h\tau} \cdot \cos k_1 \cdot \tau; \quad (18)$$

$$x_2 = C_2 \cdot e^{-h\tau} \cdot \sin k_2 \cdot \tau + D_2 \cdot e^{-h\tau} \cdot \cos k_2 \cdot \tau,$$

$$\text{где } k_1 = \sqrt{\frac{C_o}{m} + \frac{C_o \cdot \left(\frac{t_n}{t_\phi} - 1\right)}{2 \cdot m}} - h^2, \quad k_2 = \sqrt{\frac{C_o}{m} - \frac{C_o \cdot \left(\frac{t_n}{t_\phi} - 1\right)}{2 \cdot m}} - h^2.$$

Получено условие неустойчивой работы упругой системы:

$$|L| > \frac{1+M}{2}, \quad (19)$$

где

$$L = \frac{e^{-h(\tau_1+\tau_2)}}{h(k_2 + h \sin 2k_2\tau_1)} \left[ k_1^2 \sin k_1\tau_1 \sin k_2\tau_2 - \right. \\ \left. - 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \cos k_2\tau_1 \cdot \cos k_1\tau_1 \cdot \cos k_2(\tau_1 + \tau_2) - \right. \\ \left. - k_2^2 \sin k_1\tau_1 \sin(2 \cdot k_2\tau_1 + k_2\tau_2) \right]; \quad (20)$$

$$M = \frac{k_1 k_2 e^{-2h(\tau_1+\tau_2)} \cos(2 \cdot k_2 \cdot (\tau_1 + \tau_2))}{h(k_2 + h \sin 2k_2\tau_1)}, \quad (21)$$

$$\text{где } \tau_1 = \frac{l'_1}{V_{kp}}; \quad \tau_2 = \frac{l'_2}{V_{kp}};$$

$$l'_1 = \frac{\pi \cdot D_{kp}}{n \cdot (1+N)}; \quad l'_2 = \frac{\pi \cdot D_{kp}}{n \cdot \left(1 + \frac{1}{N}\right)};$$

$$N = \frac{l'_2}{l'_1} \text{ – коэффициент прерывистости; } n \text{ – число впадин на}$$

шлифовальном круге.

На рис. 3 показано влияние количества режущих выступов на прерывистом шлифовальном круге на параметрическую неустойчивость

упругой системы станка. На рис. 3 исследуемый диапазон чисел режущих выступов  $5 \leq n \leq 25$  разбит на интервалы (по три выступа в каждом).

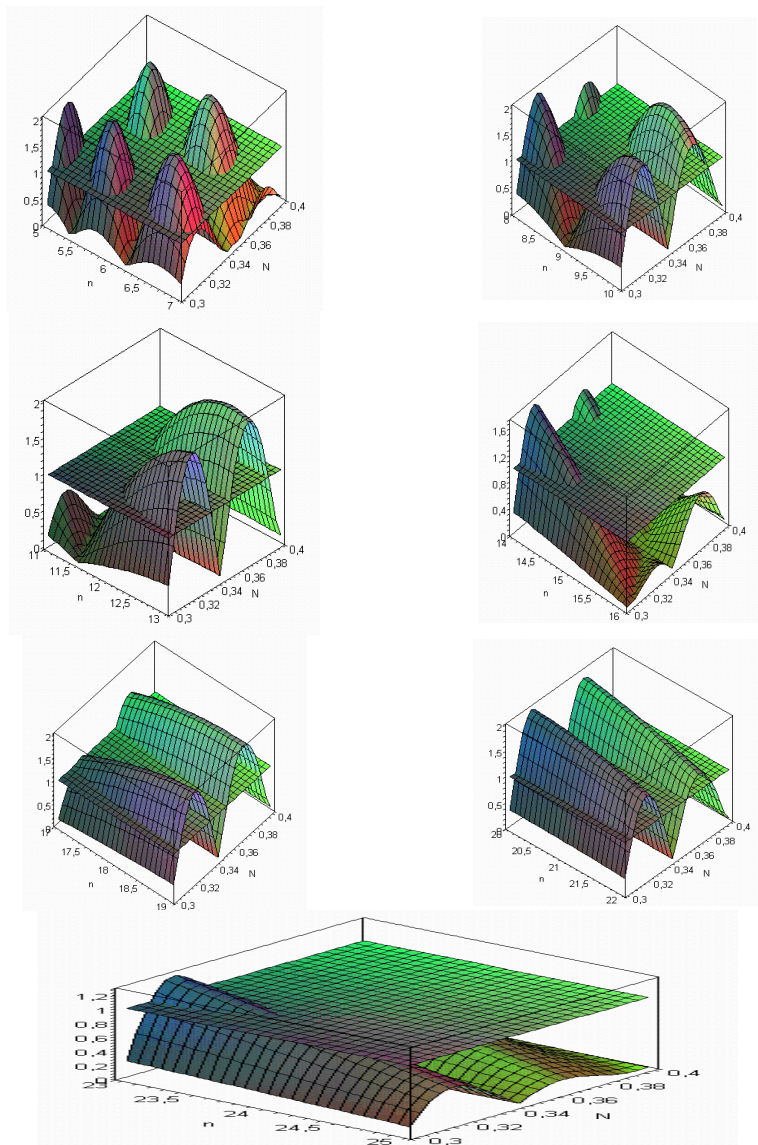


Рисунок 3 – Параметрическое возбуждение упругой системы станка на разных интервалах изменения количества режущих выступов

Рис. 3 представляет собой графические зависимости левой и правой частей условия неустойчивой работы упругой системы шлифовального станка (19) от количества режущих выступов на абразивном инструменте  $n$  и

от коэффициента прерывистости  $N = \frac{l'_2}{l'_1}$ , численно равного отношению

ширины впадины к длине выступа. Эти зависимости выглядят в виде плоской и волнообразной поверхностей, а линии их взаимного пересечения являются границами областей неустойчивой работы упругой системы станка.

**Вывод.** Избежать вынужденных и параметрических колебаний, способных ухудшить качество поверхностного слоя обработанной детали при шлифовании прерывистым кругом можно за счет правильного подбора его геометрических параметров, а именно: количества режущих выступов на абразивном инструменте и величины отношения ширины впадины к длине выступа.

**Список использованной литературы:** 1. *Оргиян, А.А.* Интенсивность параметрических резонансов при прерывистом резании / А.А. Оргиян, И.М. Творишук // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХП», –2014. – Вип.9. – С.124-133. 2. *Оргиян, О.А.* Обработка перерывчастих поверхонь на розточувальних верстатах / О.А. Оргиян, О.І. Бажанов, А.М. Бензар // Віс. Харківськ. нац. техніч. ун-у сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, – 2009. – Вип.81. – С.253-257. 3. *Линчевский, П.А.* Тонкое растачивание отверстий с прерывистой поверхностью / П.А. Линчевский, А.А. Оргиян, С.М. Онищенко // Тр. 11-й междунар. науч.-техн. конф. «Физические и компьютерные технологии», 2-3 июня 2005г. –Харьков: ХНПК «ФЭД», – 2005. – С.48-52. 4. *Оргиян, А.А.* Влияние перемности припуска на параметрическую устойчивость процесса тонкого растачивания / А.А. Оргиян, А.В. Баланюк, И.М. Творишук // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. Одеса: наука і техніка, – 2015. – Вип.3(8). – С.98-103. 5. *Никулкин, Б.И.* Исследование динамики прерывистого шлифования / Б.И.Никулкин, В.М. Рогачев //Абразивы. – 1975. – Вип.3. – С.21-77. 6. *Свирицев, В.И.* Технологическое обеспечение динамической стабилизации процессов шлифования / В.И. Свирицев //Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении. – Киев, 1995. – С.112-115.

**Bibliography (transliterated):** 1.Orgijan, A.A. Intensivnost' parametricheskikh rezonansov pri preryvistom rezanii /A.A. Orgijan, I.M. Tvorishhuk //Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni. - Harkiv: NTU «HP», -2014. - Vip.9. - S.124-133. 2.Orgijan, O.A. Obrobka pererivchastih poverhon' na roztochuval'nih verstatah /O.A. Orgijan, O.I. Bazhanov, A.M. Benzar //Vis. Harkivs'k. nac. tehnic. un- u sil'skogo gospodarstva im. P. Vasilenka. - Harkiv: HNTUSG, - 2009. - Vip.81. - S.253-257. 3.Linchevskij, P.A. Tonkoe rastachivanie otverstij s preryvistoj poverhnost'ju /P.A. Linchevskij, A.A. Orgijan, S.M. Onishhenko //Tr. 11-j mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Fizicheskie i komp'juternye tehnologii», 2-3 ijunya 2005g. -Har'kov: HNPk «FJeD», - 2005. - S.48-52. 4.Orgijan, A.A. Vlijanie peremennosti pripuska na parametricheskiju ustojchivost' processa tonkogo rastachivaniya / A.A. Orgijan, A.V. Balanjuk, I.M. Tvorishhuk //Informacijni tehnologii v osviti, nauci ta virobnictvi. Odesa: nauka i tehnika, - 2015. - Vip.3(8). - S.98-103. 5.Nikulkin, B.I. Issledovanie dinamiki preryvistogo shlifovaniya /B.I.Nikulkin, V.M. Rogachev //Abrazivy. - 1975. - Vyp.3. - S.21-77. 6.Svirshhev, V.I. Tehnologicheskoe obespechenie dinamicheskoy stabilizacii processov shlifovaniya /V.I. Svirshhev //Resurso- i jenergosberigajushhie tehnologii v mashinostroenii. - Kiev, 1995. - S.112-115.

*Поступила в редколлегию 30.07.2015*