

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ СИЛЫ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ШЛИФОВАНИИ КРУГАМИ С ПРЕРЫВИСТОЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

**Новиков Ф.В.**, докт. техн. наук, **Якимов А.А.**, канд. техн. наук  
(г. Харьков, г. Одесса, Украина)

*Research of action of periodic pulses the forces, arising at grinding by circles with the faltering working surface.*

При шлифовании кругами с прерывистой рабочей поверхностью нормальная составляющая  $P_y$  силы резания периодически изменяется (рис.1). Модель процесса прерывистого шлифования представим в виде груза (шлифовального круга), подвешенного к нижнему концу невесомой пружины. Верхний конец пружины закреплен неподвижно. Груз с массой "m" колеблется под действием повторяющихся с периодом  $T$  вертикальных импульсов  $S$ . Продолжительность действия импульса равна продолжительности контакта режущего выступа прерывистого шлифовального круга с обрабатываемой деталью

$$T_1 = \frac{l_1}{V_{kp}}$$

Период колебаний  $T$  шлифовального круга определяется временем работы участка рабочей поверхности прерывистого шлифовального круга, состоящего из режущего выступа и впадины

$$T = \frac{l_1 + l_2}{V_{kp}}$$

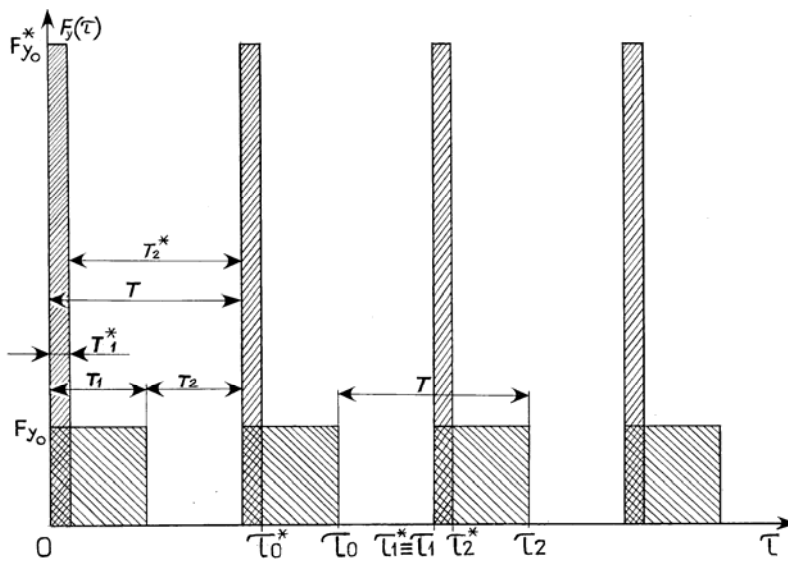


Рис. 1. Периодичность изменения нормальной составляющей силы резания при шлифовании кругом с прерывистой рабочей поверхностью.

Главной характеристикой импульсного нагружения системы является импульс силы  $S$ . Импульс нормальной составляющей  $P_y$  силы резания за время ее действия определяется

$$S = \int_0^{T_1} F_y(\tau) d\tau$$

Импульс силы имеет размерность количества движения (н.сек) и численно равен площади под графиком  $F_y(\tau)$ . Учитывая, что за период работы режущего выступа  $\tau_1$  прерывистого круга нормальная составляющая  $F_y$  силы резания не изменяется ( $F_y = F_{y,0}$ ), то ее импульс  $S$  равен площади заштрихованного прямоугольника, изображенного на рис.1.

Введем некоторую идеализацию. Вместо реальной силы  $F_{y,0}$ , которая действует в течение времени  $T_1$  рассмотрим другую силу  $F_{y,0}^*$ , которая действует в течение времени  $T_1^* \ll T_1$ , но имеет такой же импульс, что и сила  $F_{y,0}$ .

$$S = \int_0^{T_1} F_y(\tau) d\tau = \int_0^{T_1^*} F_y^*(\tau) d\tau \quad \text{или} \quad S = F_{y,0} \cdot T_1 = F_{y,0}^* \cdot T_1^* .$$

В дальнейшем вместо того, чтобы рассматривать результат действия силы  $F_{y,0}^*$  за промежуток времени  $T_1^*$  будем рассматривать действие мгновенного импульса, равного  $S$ . Замена конечного времени работы режущего выступа прерывистого круга бесконечно малым ( $T_1^* \rightarrow 0$ ) связана с неограниченным возрастанием силы  $F_{y,0}^*$ . Поэтому в рамках сделанной гипотезы о мгновенном действии силы  $F_{y,0}^*$  рассмотрим не силу, а ее импульс  $S$ .

Рассмотрим какой-либо один из периодов  $T$ , принимая начало отсчета времени в конце действия предшествующего импульса (например, в мгновение  $\tau_0^*$ ). Получив в начальный момент времени  $\tau_0^*$  удар  $S$ , груз (шлифовальный круг) в течение промежутка времени  $T$  до следующего удара движется под действием только квазиупругой восстанавливающей силы  $-C \cdot y$ . В этот промежуток времени колебания груза являются свободными (собственными). Учитывая, что сила трения при этом не учитывается, то колебания будут гармоническими. Уравнение движения груза в течение периода времени  $T$  имеет вид

$$m \cdot \ddot{y} + C \cdot y = 0 ,$$

где  $-m \cdot \ddot{y}$  – сила инерции;  $m$  – масса круга.

$$\ddot{y} + \frac{C}{m} \cdot y = 0 . \quad (1)$$

Общее решение дифференциального однородного уравнения (Л.1) имеет вид

$$y = E \cdot \cos k \cdot \tau + D \cdot \sin k \cdot \tau , \quad (2)$$

где  $k$  – собственная частота колебаний.

В этом решении нужно подобрать постоянные  $E$  и  $D$  так, чтобы для "y" были выполнены условия периодичности. Другими словами необходимо подобрать постоянные  $E$  и  $D$ , при которых за период колебания  $T$  система, выйдя из некоторого состояния  $(y, \dot{y})$ , снова возвратилась в него с теми же значениями  $(y, \dot{y})$ . В рассматриваемом случае условия периодичности имеют вид

$$y(0) - y(T) = 0 , \quad (3)$$

$$\dot{y}(0) - \left[ \dot{y}(T) + \frac{S}{m} \right] = 0 . \quad (4)$$

После подстановки условий периодичности (3) и (4) в уравнение (2) получим

$$y = E \cdot \cos 0 + D \cdot \sin 0 , \quad \sin 0 = 0 , \quad \cos 0 = 1 .$$

Следовательно

$$y = E . \quad (5)$$

Приравняем выражения (5) и (2)

$$E = E \cdot \cos k \cdot T + D \cdot \sin k \cdot T , \quad (6)$$

$$E - E \cdot \cos k \cdot T = D \cdot \sin k \cdot T ,$$

$$E \cdot (1 - \cos k \cdot T) = D \cdot \sin k \cdot T , \quad (7)$$

Производная уравнения (2) имеет вид

$$\dot{y} = -k \cdot E \cdot \sin k \cdot \tau + k \cdot D \cdot \cos k \cdot \tau. \quad (8)$$

Рассмотрим условие  $\dot{y} = 0$

$$\dot{y} = -k \cdot E \cdot \sin 0 + k \cdot D \cdot \cos 0.$$

Так как  $\sin 0 = 0$ ,  $\cos 0 = 1$ , то

$$\dot{y} = k \cdot D. \quad (9)$$

Рассмотрим условие (4)

$$k \cdot D = -k \cdot E \cdot \sin k \cdot T + k \cdot D \cdot \cos k \cdot T + \frac{S}{m}. \quad (10)$$

Разделим все слагаемые на  $k$

$$D = -E \cdot \sin k \cdot T + D \cdot \cos k \cdot T + \frac{S}{m \cdot k}, \quad (11)$$

$$D \cdot (1 - \cos k \cdot T) = -E \cdot \sin k \cdot T + \frac{S}{m \cdot k}. \quad (12)$$

Для определения постоянных  $E$  и  $D$  решим систему уравнений (7) и (12)

$$\begin{cases} E \cdot (1 - \cos k \cdot T) = D \cdot \sin k \cdot T \\ D \cdot (1 - \cos k \cdot T) = -E \cdot \sin k \cdot T + \frac{S}{m \cdot k} \end{cases} \quad (13)$$

Из второго уравнения системы (13) находим постоянный коэффициент  $D$

$$D = \frac{-E \cdot \sin k \cdot T}{(1 - \cos k \cdot T)} + \frac{\frac{S}{m \cdot k}}{(1 - \cos k \cdot T)}, \quad D = -E \cdot \operatorname{ctg} \frac{k \cdot T}{2} + \frac{\frac{S}{m \cdot k}}{(1 - \cos k \cdot T)}. \quad (14)$$

Подставляем (14) в первое уравнение системы (13)

$$\begin{aligned} E \cdot (1 - \cos k \cdot T) &= \left( -E \cdot \operatorname{ctg} \frac{k \cdot T}{2} + \frac{\frac{S}{m \cdot k}}{1 - \cos k \cdot T} \right) \cdot \sin k \cdot T, \\ E \cdot (1 - \cos k \cdot T) + E \cdot \operatorname{ctg} \frac{k \cdot T}{2} \cdot \sin k \cdot T &= \frac{S}{m \cdot k} \cdot \frac{\sin k \cdot T}{(1 - \cos k \cdot T)}, \\ E \cdot \left[ (1 - \cos k \cdot T) + \operatorname{ctg} \frac{k \cdot T}{2} \cdot \sin k \cdot T \right] &= \frac{S}{m \cdot k} \cdot \operatorname{ctg} \frac{k \cdot T}{2}, \\ E \cdot \left[ (1 - \cos k \cdot T) + \frac{\sin^2 k \cdot T}{(1 - \cos k \cdot T)} \right] &= \frac{S}{m \cdot k} \cdot \operatorname{ctg} \frac{k \cdot T}{2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Преобразуем выражение в квадратных скобках уравнения (15)

$$\begin{aligned} (1 - \cos k \cdot T) + \frac{\sin^2 k \cdot T}{(1 - \cos k \cdot T)} &= \frac{(1 - \cos k \cdot T)^2 + \sin^2 k \cdot T}{(1 - \cos k \cdot T)} = \\ &= \frac{1 - 2 \cdot \cos k \cdot T + \cos^2 k \cdot T + \sin^2 k \cdot T}{(1 - \cos k \cdot T)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Так как  $\cos^2 k \cdot T + \sin^2 k \cdot T = 1$ , то выражение (16) примет вид

$$(1 - \cos k \cdot T) + \frac{\sin^2 k \cdot T}{(1 - \cos k \cdot T)} = \frac{1 - 2 \cdot \cos k \cdot T + 1}{(1 - \cos k \cdot T)} = \frac{2 \cdot (1 - \cos k \cdot T)}{(1 - \cos k \cdot T)} = 2. \quad (17)$$

С учетом (17) выражение (15) примет вид

$$2 \cdot E = \frac{S}{m \cdot k} \cdot \operatorname{ctg} \frac{k \cdot T}{2} \quad (18)$$

$$E = \frac{S}{2 \cdot m \cdot k} \cdot \operatorname{ctg} \frac{k \cdot T}{2}. \quad (19)$$

Подставим постоянный коэффициент  $E$  из (19) в первое уравнение системы (13)

$$(1 - \cos k \cdot T) \cdot \frac{S}{2 \cdot m \cdot k} \cdot \operatorname{ctg} \frac{k \cdot T}{2} = D \cdot \sin k \cdot T, \\ D = \frac{(1 - \cos k \cdot T)}{\sin k \cdot T} \cdot \frac{S}{2 \cdot m \cdot k} \cdot \operatorname{ctg} \frac{k \cdot T}{2}. \quad (20)$$

Так как  $\frac{(1 - \cos k \cdot T)}{\sin k \cdot T} = \operatorname{tg} \frac{k \cdot T}{2}$ , то выражение (20) примет вид

$$D = \frac{S}{2 \cdot m \cdot k} \cdot \operatorname{tg} \frac{k \cdot T}{2} \cdot \operatorname{ctg} \frac{k \cdot T}{2} = \frac{S}{2 \cdot m \cdot k}, \quad D = \frac{S}{2 \cdot m \cdot k}. \quad (21)$$

Подставив постоянные коэффициенты  $E$  из (19) и  $D$  из (21) в выражение (2), получим закон движения груза

$$y = \frac{S}{2 \cdot m \cdot k} \cdot \operatorname{ctg} \frac{k \cdot T}{2} \cdot \cos k \cdot \tau + \frac{S}{2 \cdot m \cdot k} \cdot \sin k \cdot \tau, \\ y = \frac{S}{2 \cdot m \cdot k} \cdot \left( \sin k \cdot \tau + \cos k \cdot \tau \cdot \operatorname{ctg} \frac{k \cdot T}{2} \right). \quad (22)$$

Подставив в выражение (22)  $T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}$ , получим

$$y = \frac{S}{2 \cdot m \cdot k} \cdot \left( \sin k \cdot \tau + \cos k \cdot \tau \cdot \operatorname{ctg} \frac{k \cdot \pi}{\omega} \right), \quad (23)$$

$$y = \frac{S}{2 \cdot m \cdot k} \cdot \left( \sin k \cdot \tau + \cos k \cdot \tau \cdot \frac{\cos \frac{k \cdot \pi}{\omega}}{\sin \frac{k \cdot \pi}{\omega}} \right). \quad (24)$$

Определим амплитуду колебаний  $Y_1$ . Сделаем замену  $\tau = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega}$ . Тогда выра-

жение (24) примет вид 
$$y = \frac{S}{2 \cdot m \cdot k} \cdot \left( \sin \frac{k \cdot \pi}{\omega} + \cos \frac{k \cdot \pi}{\omega} \cdot \frac{\cos \frac{k \cdot \pi}{\omega}}{\sin \frac{k \cdot \pi}{\omega}} \right).$$

Приводим к общему знаменателю

$$y = \frac{S}{2 \cdot m \cdot k} \cdot \left( \frac{\sin^2 \frac{k \cdot \pi}{\omega} + \cos^2 \frac{k \cdot \pi}{\omega}}{\sin \frac{k \cdot \pi}{\omega}} \right). \quad (25)$$

Учитывая, что  $\sin^2 \frac{k \cdot \pi}{\omega} + \cos^2 \frac{k \cdot \pi}{\omega} = 1$ , выражение (25) примет вид

$$Y_1 = \frac{S}{2 \cdot m \cdot k} \cdot \frac{1}{\left| \sin \frac{k \cdot \pi}{\omega} \right|}. \quad (26)$$

Полученная формула для расчета амплитуды колебаний позволяет легко исследовать влияние периодических ударов. Выражение (26) не учитывает колебаний груза во время действия импульса силы  $S$ . Подставим в выражение (26) следующие параметры:

$$S = F_{y,0} \cdot \tau_1,$$

где  $\tau_1$  – время контакта режущего выступа с деталью;  $F_{y,0}$  – нормальная составляющая силы резания во время контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью.

$$k = \sqrt{\frac{C}{m}} \text{ – собственная частота системы,}$$

где  $C$  – жесткость системы;  $m$  – масса шлифовального круга.

$$Y_1 = \frac{F_{y,0} \cdot \tau_1}{2 \cdot m \cdot \sqrt{\frac{C}{m}} \cdot \sin\left(\pi \cdot \sqrt{\frac{C}{m}} / \omega\right)}, \quad (27)$$

$$\tau_1 + \tau = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}, \quad (\tau_1 + \tau_2) = \alpha \cdot \tau_1 = \frac{(\tau_1 + \tau_2)}{\tau_1} \cdot \tau_1,$$

$$\tau_1 = \frac{(\tau_1 + \tau_2)}{\alpha} = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \cdot \frac{1}{\alpha}, \quad (28)$$

$$\frac{1}{m} = \frac{C}{m \cdot C} = \sqrt{\frac{C}{m}} \cdot \sqrt{\frac{C}{m}} \cdot \frac{1}{C}. \quad (29)$$

Подставив в формулу (27) выражения (28) и (29), получим

$$Y_1 = \frac{F_{y,0} \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{C}{m}}}{\omega \cdot \alpha \cdot C \cdot \sin\left(\pi \cdot \sqrt{\frac{C}{m}} / \omega\right)}, \quad (30)$$

$$Y_{cm} = \frac{F_{y,0}}{C}. \quad (31)$$

Подставив в формулу (30) выражение (31), получим

$$Y_1 = \frac{\pi \cdot Y_{cm} \cdot \sqrt{\frac{C}{m}}}{\omega \cdot \alpha \cdot \sin\left(\pi \cdot \sqrt{\frac{C}{m}} / \omega\right)}, \quad (32)$$

Выражение (27) представим в виде

$$Y_1 = \beta \cdot \frac{F_{y,0} \cdot \tau_1}{m \cdot K}, \quad (33)$$

где  $\beta = \frac{1}{2 \cdot \left| \sin\left(\frac{\pi \cdot k}{\omega}\right) \right|}$  – коэффициент, учитывающий влияние повторности импульсов силы.

На рис. 2 и 3 показано изменение коэффициента  $\beta$  в зависимости от количества режущих выступов  $n$  на прерывистом шлифовальном круге. На графиках  $\beta = f(n)$  параллельно оси  $n$  проведена ось  $\omega$ , на которой отложены числовые значения частот вынужденных колебаний, рассчитанных по формуле

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot V_{kp} \cdot \frac{1}{(l_1 + l_2)} = 2 \cdot \pi \cdot V_{kp} \cdot \frac{n}{\pi \cdot D_{kp}} = \frac{2 \cdot V_{kp} \cdot n}{D_{kp}}. \quad (34)$$

Из формулы (34) видно, что частота вынужденных колебаний  $\omega$  прямо пропорциональна числу режущих выступов  $n$  на шлифовальном круге.

Графики  $\beta = f(n)$  построены для частот свободных колебаний  $k = 300 \frac{1}{сек}$  (рис.2) и  $k = 772 \frac{1}{сек}$  (рис.3). Исходные данные для расчета коэффициента повторности импульса силы  $\beta$  сведены в табл. 1.

В расчетах было принято, что длина режущего выступа  $l_1$  равна ширине впадины  $l_2$ , число оборотов шпинделя  $n_{oi} = 2800 \frac{i\dot{a}}{i\dot{e}i}$ , жесткость шпиндельного узла  $\tilde{N} = 500000 \frac{e\ddot{a}}{i}$ , нормальная составляющая силы резания  $P_y = 5$  кг.

Таблица 1

$k = 300 \frac{1}{сек}$			$k = 772 \frac{1}{сек}$		
Круг ПП 300×40×127 24A25CM26K5 ГОСТ 1792-72			Круг ПП 250×10×127 24A25CM26K5 ГОСТ 1792-72		
Масса круга $m_{kp} = 5,32$ кг			Масса круга $m_{kp} = 0,84$ кг		
$V_{kp} = 45$ м/сек			$V_{kp} = 36,6$ м/сек		
$n$	$l_1$ ; мм	$\tau_1 \cdot 10^{-4}$ ; сек	$n$	$l_1$ ; мм	$\tau_1 \cdot 10^{-4}$ ; сек
4	117,0	26,4	4	98,0	27,5
6	78,50	17,4	6	65,0	18,0
8	58,88	13,1	8	49,0	14,0
10	42,10	10,5	10	39,0	11,0
12	39,25	8,6	12	33,0	9,2
14	33,04	7,5	14	28,0	7,9
16	29,40	6,5	16	25,0	6,9
18	26,17	5,8	18	22,0	6,1
20	23,55	5,2	20	19,6	5,5
30	15,70	3,5	30	1,3	3,7
40	11,78	2,6	40	9,8	2,8
50	9,42	2,1	50	7,85	2,2
60	7,85	1,7	60	6,50	1,8
80	5,88	1,3	80	6,25	1,7
			96	3,80	1,0

Из выражения (27) и из графиков  $\beta = f(\omega)$  видно, что резонанс возникает, ес-

ли частота вынужденных колебаний  $\omega$  будет совпадать с частотой свободных колебаний  $k$  или будет меньше ее в целое число раз. Наименьшее значение коэффициента повторности  $\beta$  равно 0,5. Для предотвращения появления ударного резонанса должно соблюдаться условие  $\frac{\omega}{k} > 1$ , т.е. частота вынужденных колебаний  $\omega$  должна быть больше частоты свободных колебаний  $k$ .

На рис. 2 и 3, помимо графиков  $\beta = f(n)$ , приведены зависимости амплитуды вынужденных колебаний, рассчитанной по формуле (33) с учетом (точечная кривая) и без учета (штриховая кривая) коэффициента повторности  $\beta$ , от количества режущих выступов  $n$  на прерывистом шлифовальном круге.

Из рис.2 и 3 видно, что кривая, характеризующая максимальное отклонение, вызванное однократным импульсом силы  $\frac{Y_1}{\beta} = f(n)$ , пересекается с кривой, описывающей изменение амплитуды вынужденных колебаний  $Y_1 = f(n)$ , в точках  $C$  и  $D$ .

Из рис.2 и 3 видно, что кривая, характеризующая максимальное отклонение, вызванное однократным импульсом силы  $\frac{Y_1}{\beta} = f(n)$ , пересекается с кривой, описывающей изменение амплитуды вынужденных колебаний  $Y_1 = f(n)$ , в точках  $C$  и  $D$ .

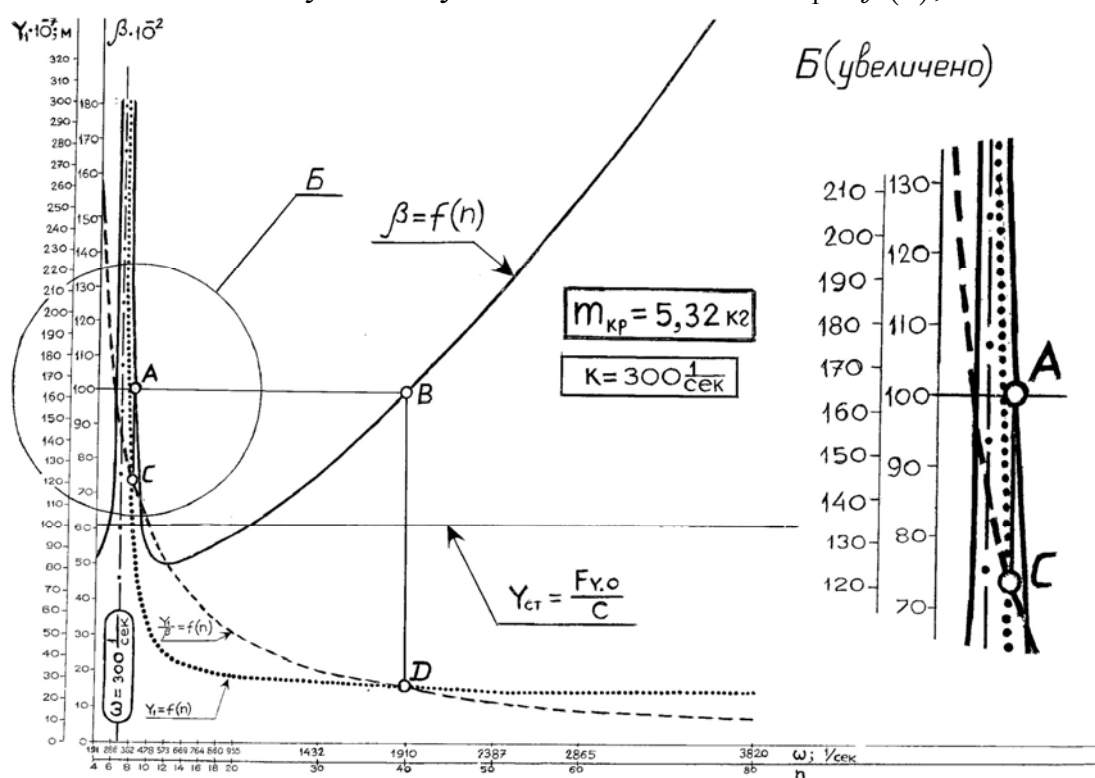


Рис.2. Зависимость амплитуды  $Y_1$  вынужденных колебаний, возникающих при прерывистом шлифовании, и коэффициента  $\beta$ , учитывающего повторность действия импульсов силы, от числа режущих выступов  $n$  на шлифовальном круге ПП 300×40×127 24A25CM26K5 ГОСТ 1792-72.

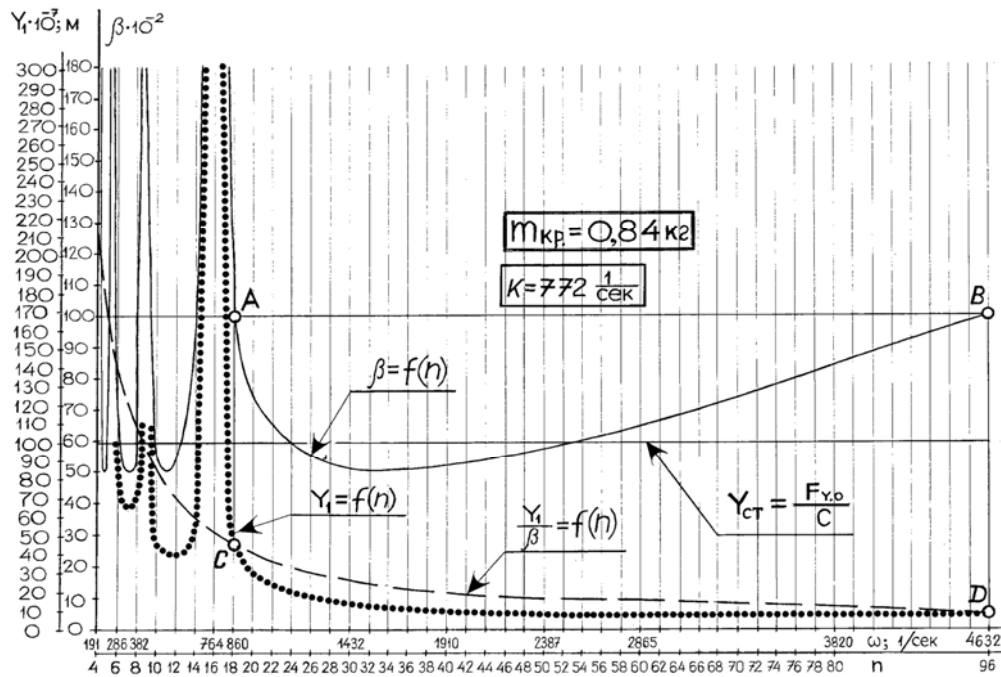


Рис.3. Зависимость амплитуды  $Y_1$  вынужденных колебаний, возникающих при прерывистом шлифовании, и коэффициента  $\beta$ , учитывающего повторность действия импульсов силы, от числа режущих выступов  $n$  на шлифовальном круге ПП 250×10×127 24A25CM26K5 ГОСТ 1792-72.

Из графиков видно, что точки  $C$  и  $D$  соответствуют точкам  $A$  и  $B$  на кривой  $\beta = f(n)$ , в которых коэффициент  $\beta = 1$ .

Из графиков, представленных на рис.2 и 3 видно, что с увеличением частоты собственных колебаний от  $k = 300 \frac{1}{сек}$  до  $k = 772 \frac{1}{сек}$  (т.е. с уменьшением массы шлифовального круга от  $m_{кр} = 5,32$  кг до  $m_{кр} = 0,84$  кг) влияние коэффициента  $\beta$  на амплитуду вынужденных колебаний  $Y_1$  значительно снизилась. Это видно из того, что при  $m_{кр} = 5,32$  кг кривые  $Y_1 = f(n)$  и  $\frac{Y_1}{\beta} = f(n)$  в промежутке между точками  $C$  и  $D$  заметно расходятся друг от друга, а при  $m_{кр} = 0,84$  кг в том же промежутке точки совпадают.

Другими словами, с уменьшением массы шлифовального круга амплитуда вынужденных колебаний определяется главным образом импульсом силы  $S = F_{y.0} \cdot \tau_1$ , а коэффициент  $\beta$ , учитывающий влияние повторности этих импульсов, является менее значимым фактором. С уменьшением длины режущего выступа прерывистого круга время контакта  $\tau_1$  уменьшается. Соответственно уменьшаются импульс силы  $S$  и амплитуда вынужденных колебаний  $Y_1$ , т.е. становятся больше фактическая глубина резания и истинный сьем металла, но при этом больше толщина среза и выше вероятность контакта обрабатываемого материала со связкой круга.

Контакт обрабатываемого металла со связкой приводит к износу последней и повышению режущей способности шлифовального круга, т.е. абразивный круг как бы переходит в режим самозатачивания. С физической точки зрения снижение амплитуды колебаний  $Y_1$  означает, что шлифовальный круг не успевает среагировать на импульс силы и получить перемещение, равное статическому приложению той же силы  $F_y$ . При этом чем меньше время контакта  $\tau_1$  режущего выступа с обраба-



тываемым металлом, тем меньше амплитуда колебаний  $Y_1$ .

Из рис. 2 и 3 видно, что снижение амплитуды колебаний  $Y_1$  возможно только на участке кривой  $Y_1 = f(n)$ , ограниченной точками  $C$  и  $D$ , т.е. в интервале изменения коэффициента  $\beta$ ,  $0,5 \leq \beta \leq 1,0$ . При  $\beta > 1$  (на рис.2 и 3 это соответствует участку графика  $Y_1 = f(n)$ , расположенному правее точки  $D$ ) снижения амплитуды колебаний  $Y_1$  от увеличения числа " $n$ " режущих выступов и, следовательно, от уменьшения их размеров  $l_1$  не наблюдается. Участок кривой  $Y_1 = f(n)$ , расположенный правее точки  $D$  параллелен оси абсцисс и попытки дальнейшего снижения амплитуды вынужденных колебаний  $Y_1$  за счет уменьшения размеров режущих выступов  $l_1$  (или увеличения их количества на шлифовальном круге) лишены всякого смысла.

На рис. 4 представлены кривые изменения параметров, характеризующих режущую способность сплошных и прерывистых ( $l_1=36$  мм;  $l_2=24$  мм) шлифовальных кругов 24A25СМ16К5 от времени. За 12-ти минутный период шлифования стали Х12М на режиме ( $t = 0,03$  мм;  $V_{kp} = 34,5$  м/с;  $V_{\delta} = 0,1$  м/с;  $S_{non} = 0$ ;  $F_y = 1,2$  н/мм) сплошным кругом 24A25СМ16К5 удельная работа шлифования увеличилась в 3,4 раза, т. е. от 0,45 до 1,5 Дж/мм<sup>3</sup>. После 12-минутного периода шлифования прерывистым кругом удельная работа шлифования возросла от 0,38 до 0,6 Дж/мм<sup>3</sup>. Удельный съем металла при шлифовании

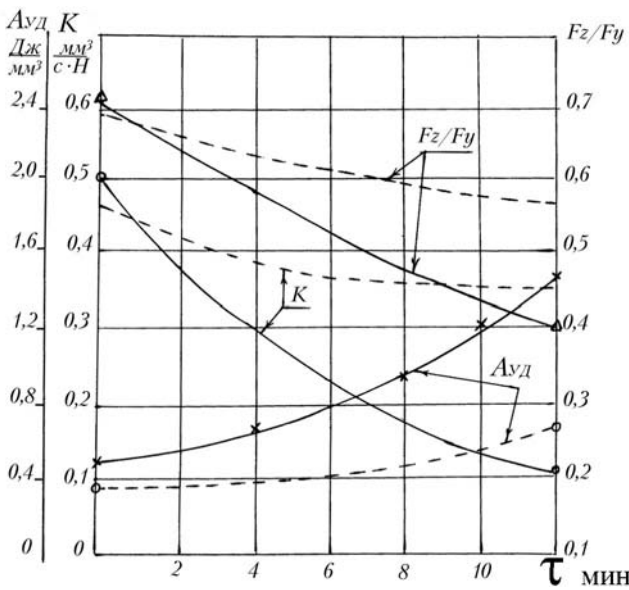


Рис.4. Зависимость удельной работы шлифования  $A_{уд}$ , удельного съема металла  $K$  и коэффициента шлифования  $F_z/F_y$  от времени. Контурные линии – сплошной круг, пунктирные – прерывистый.

сплошным и прерывистым кругами уменьшился от 0,5 до 0,1 мм<sup>3</sup>/(с·н) и от 0,45 до 0,35 мм<sup>3</sup>/(с·н) соответственно. Увеличивается мощность затрачиваемая на резание и температура.

Для восстановления режущей способности круга требуется производить правку круга. Правку обычного круга следует производить после 3-4 минут работы. Количество правок при прерывистом шлифовании сокращается примерно в 5-7 раз по сравнению с обычными сплошными кругами. Установлено, что примерно 85-90% абразива расходуется при правке. На самозатачивание расходуется абразива 10-15 % от общего износа кругов.

Таким образом, из расчетных зависимостей (рис.2 и 3) и экспериментальных данных, приведенных на рис.4, вытекает вывод: при прерывистом шлифовании имеет место контакт и трение связки с обрабатываемым материалом в результате удара, который приводит к более интенсивному износу связки (по сравнению со сплошным шлифованием) и регулированию микрорельефа рабочей поверхности круга, обеспечивая его самозатачивание и высокую режущую способность.

Таким образом, прерывистость обработки за счет динамики принципиально изменяет закономерности съема материала и механизм износа круга и позволяет кардинально решить проблему поддержания высокой режущей способности круга в процессе шлифо-

вания. Таким образом, прерывистость обработки за счет динамики принципиально изменяет закономерности съема материала и механизм износа круга и позволяет кардинально решить проблему поддержания высокой режущей способности круга в процессе шлифо-

вания, т.е. прерывистость обработки обеспечивает одновременно высокопроизводительный съем и эффективную праку круга, т.е. создает эффект механики шлифования.

Из выражения (32) следует вывод, что с увеличением частоты импульсов  $\omega$  происходит уменьшение амплитуды вынужденных колебаний  $Y_1$ . С учетом

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = \frac{2 \cdot \pi \cdot V_{kp}}{(l_1 + l_2)} \quad (\text{где } l_1 \text{ и } l_2 - \text{длины выступов и впадин прерывистого круга})$$

увеличение скорости круга  $V_{kp}$  и уменьшение  $(l_1 + l_2)$  (т.е. увеличение количества выступов на круге  $n$ ) приводит к возрастанию частоты импульсов  $\omega$  и, следовательно, к снижению амплитуды вынужденных колебаний  $Y_1$ . Это указывает на то, что применение прерывистого шлифования (при условии оптимального соотношения  $\frac{\pi \cdot k}{\omega}$ , т.е. при обеспечении условия отвода от резонанса  $\sin\left(\frac{\pi \cdot k}{\omega}\right) \neq 0$ ) позволяет за счет увеличения скорости круга  $V_{kp}$  и уменьшения  $(l_1 + l_2)$  уменьшить амплитуду колебаний  $Y_1$ . Это создает возможность приблизить фактическую глубину шлифования к номинальной, увеличить производительность, повысить глубину внедрения материала в рабочую поверхность круга, обеспечить разрушение связки и работу круга в режиме самозатачивания, т.е. обеспечить постоянство во времени режущей способности круга. При сплошном шлифовании это не достигается.

Таблица 2

Шлифовальные круги-тарелки на керамической связке Тип 3 (ГОСТ 2424-67) D×H×d	Частота собственных колебаний $K = \sqrt{\frac{C}{m_{kp}}}$	Масса шлифовального круга, $m_{kp}$ , кг	Минимальное число режущих выступов на прерывистом круге $n$ , исключающее появление ударного резонанса
225×18×40	780	0,82	16
225×18×90	845	0,70	18
275×33×90	608	1,35	13
280×33×90	512,9	1,90	11
350×30×150	447	2,50	9
450×29×27	353	4,00	8
500×32×203	333	4,50	7

Из этого можно заключить, что прерывистое шлифование, по сути, – новый метод правки круга непосредственно в процессе шлифования. В табл. 2 приведены сведения, указывающие на то, какое должно быть минимальное количество режущих выступов на прерывистом шлифовальном круге – тарелке (тип 3 ГОСТ 2424-67), чтобы исключить при шлифовании этими кругами появление ударного резонанса.