

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ НА ПАРАМЕТРЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук

(Харьковский национальный экономический университет)

В работе приведены результаты теоретических исследований параметров механической обработки с учетом колебаний в технологической системе.

В процессе механической обработки резания под действием возникающих переменных сил в технологической системе возбуждаются колебания, которые приводят к снижению точности, производительности и других параметров обработки. Проблеме уменьшения колебаний в научно-технической литературе уделено большое внимание [1, 2, 3]. Вместе с тем, данная проблема весьма сложна и требует дальнейших исследований. Поэтому целью работы является теоретический анализ влияния колебаний, возникающих в технологической системе, на основные показатели обработки.

Для оценки динамического состояния технологической системы при резании рассмотрим основные соотношения динамики материальной точки.

Известно, что изменение количества движения материальной точки за некоторое время равно импульсу приложенной к ней силы за то же время, т.е.

$m \cdot V - m \cdot V_0 = P \cdot \tau$, откуда $P = m \cdot \frac{V - V_0}{\tau} = m \cdot \frac{dV}{d\tau} = m \cdot \frac{d\dot{x}}{d\tau}$, где m - масса материальной точки, кг; V, V_0 - конечное и начальное значения скорости движения материальной точки, м/с; P - сила, Н; τ - время, с; x - перемещение материальной точки, м; \dot{x} - скорость движения материальной точки, м/с. Решим полученное дифференциальное уравнение, для чего представим его в виде:

$(P/m) \cdot d\tau = d\dot{x}$. Проинтегрировав левую и правую части уравнения, имеем: $(P/m) \cdot \tau = \dot{x} + C_1$. Постоянную интегрирования C_1 определим из начального условия: $\dot{x}(\tau = 0) = V_0$, откуда $C_1 = -V_0$; $\frac{P}{m} \cdot \tau = \dot{x} - V_0$ или $\frac{P}{m} \cdot \tau = \frac{dx}{d\tau} - V_0$, или

$\left(\frac{P}{m} \cdot \tau + V_0 \right) \cdot d\tau = dx$.

Проинтегрируем обе части уравнения: $x = \frac{P}{m} \cdot \frac{\tau^2}{2} + V_0 \cdot \tau + C_2$. Постоянную интегрирования C_2 определим из начального условия: $x(\tau = 0) = 0$, откуда

$C_2 = 0$; $x = V_0 \cdot \tau + \frac{a \cdot \tau^2}{2}$, где $a = P/m$ - ускорение движения материальной точки. Данная зависимость справедлива для равноускоренного движения материальной точки. Для равнозамедленного движения ускорение a необходимо взять со знаком “минус”:

$$x = V_0 \cdot \tau - \frac{a \cdot \tau^2}{2}. \quad (1)$$

Из зависимости (1) определим время τ , при котором $\dot{x} = 0$. Для этого продифференцируем зависимость (1) по времени: $\dot{x} = V_0 - a \cdot \tau$. При $\dot{x} = 0$ имеем: $\tau = \frac{V_0}{a} = \frac{m \cdot V_0}{P}$. В результате пришли к начальной зависимости при условии $V = \dot{x} = 0$.

Из зависимости (1) найдем значение x , при котором выполняется условие $\dot{x} = 0$: $x = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot P}$. Откуда следует закон сохранения энергии: $P \cdot x = \frac{m \cdot V_0^2}{2}$, где $P \cdot x$ - работа, совершаемая силой P на пути длиной x , Дж; $\frac{m \cdot V_0^2}{2}$ - кинетическая энергия массы m , движущейся с начальной скоростью V_0 , Дж.

Например, при деформировании пружины жесткостью c , возникающая при этом упруго-восстанавливающая сила P равна $P = c \cdot x$, где x - величина сжатия пружины. Тогда закон сохранения энергии примет вид: $c \cdot x^2 = \frac{m \cdot V_0^2}{2}$.

Определим из зависимости (1) время τ (при котором $\dot{x} = V_1$):

$$\tau = \frac{m \cdot (V_0 - V_1)}{P}. \quad (2)$$

Из зависимости (1) найдем величину x , при которой $\dot{x} = V_1$:

$$x = \frac{m}{2 \cdot P} \cdot (V_0^2 - V_1^2). \quad (3)$$

Данная зависимость справедлива для равнозамедленного движения, при равноускоренном движении ($V_1 > V_0$):

$$x = \frac{m}{2 \cdot P} \cdot (V_1^2 - V_0^2). \quad (4)$$

Зависимости (3) и (4) в общем виде выражают закон сохранения энергии, который согласно зависимости (3) описывается:

$$P \cdot x = \frac{m}{2} \cdot (V_0^2 - V_1^2). \quad (5)$$

Преобразуем правую часть (5): $\frac{m}{2} \cdot (V_0 - V_1) \cdot (V_0 + V_1) = m \cdot (V_0 - V_1) \cdot V_{cp}$, где $V_{cp} = (V_0 + V_1) / 2$ - средняя скорость движения.

Применительно к деформированию пружины жесткостью c , когда $P = c \cdot x$, закон сохранения энергии (5) после преобразования опишется:

$$c \cdot x^2 = m \cdot (V_0 - V_1) \cdot V_{cp}. \quad (6)$$

Рассматривая $\tau = x / V_{cp}$, имеем $c \cdot x = m \cdot (V_0 - V_1) / \tau$. Для бесконечно малых значений $\tau = \Delta\tau$, $(V_0 - V_1) = -\Delta V$ справедливо $\frac{-\Delta V}{\Delta\tau} = -\ddot{x}$ и уравнение

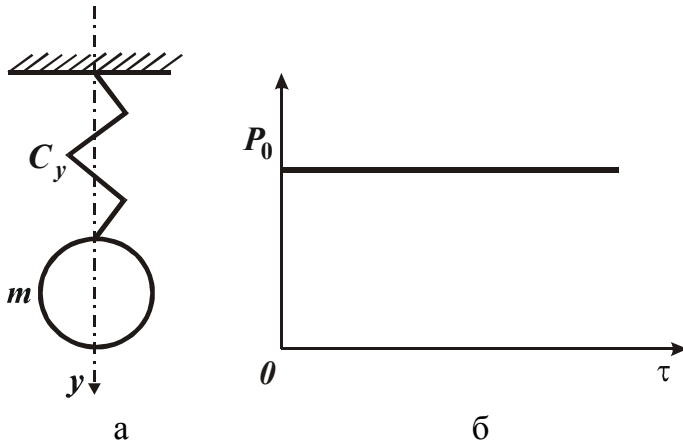


Рис. 1. Расчетная схема (а) и график зависимости P_0 от τ (б).

$$x = C_1 \cdot \sin k\tau + C_2 \cdot \cos k\tau \text{ или } x = A \cdot \sin(k\tau + \alpha),$$

где A - амплитуда колебаний, α - начальная фаза. Постоянные C_1 и C_2 определяются из начальных условий: $C_1 = V_0 / k$, $C_2 = x_0$. Тогда

$$x = \frac{V_0}{k} \cdot \sin k\tau + x_0 \cdot \cos k\tau, \quad (9)$$

где

$$A = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{V_0}{k}\right)^2}, \quad \alpha = \arctg\left(\frac{k \cdot x_0}{V_0}\right). \quad (10)$$

Как видим, амплитуда колебаний A тем больше, чем больше начальные значения перемещения x_0 и скорости движения V_0 массы m и меньше собственная частота колебаний k . Происходящее в этих условиях движение массы m представляет собой свободные колебания. Данное решение получено без учета действия сил сопротивления, которые приводят, как известно, к затуханию колебаний.

Если в уравнении (5) силу P принять в виде: $P = c \cdot x - P_0$ (рис. 1,б), то преобразованное уравнение (7) опишется:

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot x = P_0. \quad (11)$$

Частное решение уравнения: $x = A_0$, где $A_0 = P_0 / c = x_{cm}$ - статическое перемещение массы m от силы P_0 . Общее решение уравнения (11):

$$x = C_1 \cdot \sin k\tau + C_2 \cdot \cos k\tau + x_{cm},$$

где $k = \sqrt{c/m}$ - собственная частота колебаний.

Постоянные C_1 и C_2 определим из начальных условий: $x(\tau = 0) = 0$; $\dot{x}(\tau = 0) = 0$. Тогда $C_1 = 0$, $C_2 = -x_{cm}$ и соответственно

$$x = x_{cm} \cdot (1 - \cos k\tau). \quad (12)$$

Характер изменения пере-

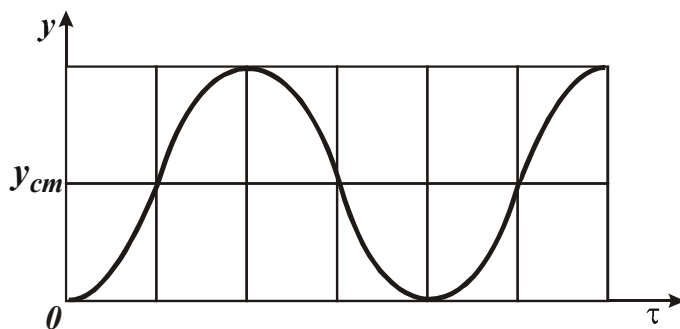


Рис. 2. Изменение перемещения y от времени τ .

мещения x во времени показан на рис. 2. Максимальное значение x_{max} равно $x_{max} = 2 \cdot x_{cm}$ при $k \cdot \tau = \pi$, т.е. динамическое перемещение в два раза превышает статическое.

При действии кратковременного импульса силы P_0 , когда $k \cdot T_1 < \pi$ (где T_1 - время действия импульса силы, рис. 3), перемещение x , исходя из зависимости (12), равно

$$x = 2 \cdot x_{cm} \cdot \sin^2 \frac{kT_1}{2} \approx x_{cm} \cdot \frac{k^2 \cdot T_1^2}{2}. \quad (13)$$

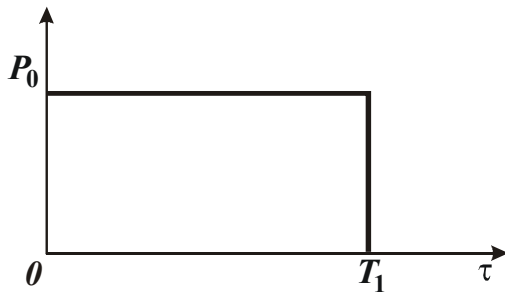


Рис. 3. Изменение силы P_0 от времени τ .

При $T_1 \rightarrow 0$ имеем $x \rightarrow 0$, т.е. в этих условиях можно добиться значительного уменьшения амплитуды колебаний.

Данное решение может быть использовано для аналитического описания динамики процесса прерывистого резания (например, строгания), обусловленное соударением двух тел (режущего инструмента и обрабатываемой заготовки) в момент врезания инструмента в обрабатываемый материал.

За счет возбуждения в технологической системе колебаний упругие деформации инструмента в момент врезания увеличиваются в два раза, что может привести к снижению стойкости инструмента, снижению производительности и качества обработки. Используя данное решение, рассмотрим колебания режущего инструмента в направлении, перпендикулярном движению инструмента, т.е. в направлении оси y (считая, что инструмент движется в направлении оси x). Для этого в решении вместо параметра x будем рассматривать параметр y . Проведем анализ колебаний массы m по закону (11) в связи с изменением толщины среза. Силу P_0 условно представим в виде: $P_0 = P_{y0} - \bar{P}_y$, где

$$P_{y0} = \frac{P_{z0}}{K_{рез}} = \frac{\sigma \cdot b \cdot a}{K_{рез}}; \quad \bar{P}_y = \frac{\sigma \cdot b \cdot y}{K_{рез}}; \quad a, b - \text{толщина и ширина среза, м; } \sigma - \text{условное напряжение резания, Н/м}^2.$$

Уравнение (11) примет вид:

$$m \cdot \ddot{y} + \bar{c} \cdot y = P_{y0}, \quad (14)$$

где $\bar{c} = c + \frac{\sigma \cdot b}{K_{рез}}$.

Решение уравнения (14) имеет вид, аналогичный (12):

$$y = \bar{y}_{cm} \cdot (1 - \cos \bar{k} \tau), \quad (15)$$

где $\bar{y}_{cm} = \frac{P_{y0}}{\bar{c}}$; $\bar{k} = \sqrt{\frac{c + \frac{\sigma \cdot b}{K_{рез}}}{m}}$ - собственная частота системы.

Увеличение жесткости системы c на величину $\sigma \cdot b / K_{рез}$ ведет к увеличе-

нию собственной частоты системы \bar{k} . Следовательно, в процессе резания жесткость \bar{c} и частота \bar{k} зависят от условий обработки. Например, по мере затупления инструмента, т.е. с увеличением соотношения $\sigma / K_{рез}$ жесткость \bar{c} и частота \bar{k} увеличиваются. Величина \bar{y}_{cm} определится:

$$\bar{y}_{cm} = \frac{a}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot b}\right)}. \quad (16)$$

Чем меньше $a, b, \sigma / K_{рез}$ и больше c , тем меньше \bar{y}_{cm} . При заданных значениях a, b, c уменьшить \bar{y}_{cm} и соответственно y можно уменьшением соотношения $\sigma / K_{рез}$ (повышением режущей способности инструмента).

При определенных условиях возможен случай $y > a$, т.е. инструмент будет выходить из контакта с обрабатываемым материалом.

Колебания при шлифовании прерывистых поверхностей. Прерывистое резание является наиболее сложным и в то же время наименее изученным вопросом в теории обработки металлов резанием. Многочисленные исследования, проведенные с целью выявления основных закономерностей процесса и в первую очередь объяснения низкой работоспособности инструмента, привели к противоречивым результатам. В одних случаях специалисты считают основным фактором, влияющим на показатели процесса, механический удар инструмента с деталью во время врезания, в других случаях предпочтение отдается тепловым и адгезионным явлениям, сопровождающим процесс обработки.

Обработка прерывистых поверхностей характеризуется периодическим кратковременным взаимодействием инструмента и детали. В отличие от установившегося процесса резания, при котором технологическая система находится в статическом равновесии, неустановившийся процесс обладает дисбалансом подводимой и расходуемой энергии. Как известно, часть энергии идет на пластические деформации обрабатываемого металла и отделение стружки, т.е. на процесс резания, а часть энергии расходуется на упругие деформации элементов технологической системы. Так, при установившемся процессе резания соотношение этих энергий во времени устанавливается и практически остается неизменным, а в случае прерывистого резания, когда взаимодействие сопровождается механическим ударом, это соотношение не постоянно на протяжении времени контакта.

В момент врезания значительная часть энергии затрачивается на деформацию элементов технологической системы. Через некоторое время процесс устанавливается и в принципе ничем не отличается от обычного резания. Поэтому основная особенность обработки прерывистых поверхностей заключена в начальной стадии взаимодействия инструмента с деталью.

Ударное воздействие характеризуется приложением большой по величине энергии за малые промежутки времени. Применительно к шлифованию прерывистых поверхностей это означает, что величина импульса силы определяется относительными линейными скоростями шлифовального круга и детали. В свя-

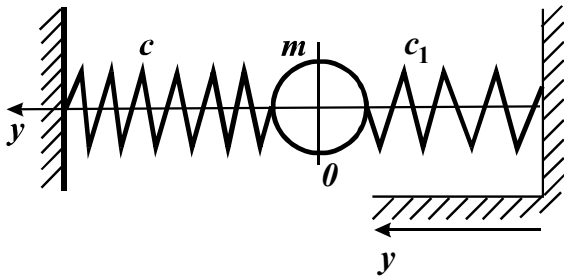


Рис. 4. Расчетная схема колебаний элементов технологической системы.

является основным показателем, характеризующим физическую сторону процесса шлифования прерывистых поверхностей, что предопределяет необходимость исследования ударного взаимодействия круга с обрабатываемым элементом детали.

Для этого рассмотрим следующую расчетную схему (рис. 4), в которой шлифовальный круг представлен сосредоточенной массой m , связанной с неподвижной опорой посредством пружины жесткостью c (где c - приведенная жесткость технологической системы).

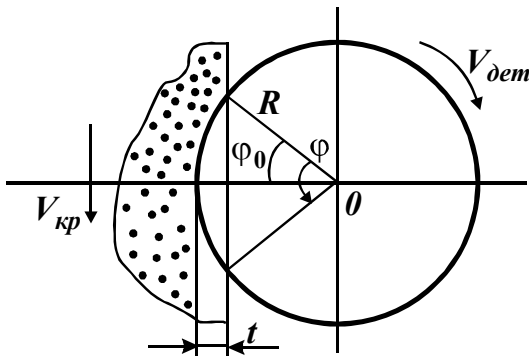


Рис. 5. Расчетная схема формы импульса силы ударного взаимодействия обрабатываемого элемента с кругом.

Характер взаимодействия обрабатываемого элемента детали с кругом (внедрение элемента в рабочую поверхность круга) учитывается жесткостью c_1 , определяющей местные деформации рабочей поверхности круга. Система “детали” принимается абсолютно жесткой, движущейся в горизонтальном направлении по известному закону, описываемому законом изменения параметра \bar{y} . Закон изменения параметра \bar{y} может быть установлен, исходя из расчетной схемы, приведенной на рис. 5.

Закон изменения параметра \bar{y} может быть установлен, исходя из расчетной схемы, приведенной на рис. 5.

$$\bar{y} = t - [R - R \cdot \cos(\varphi_0 - \varphi)] = t - R \cdot 2 \sin^2 \frac{(\varphi_0 - \varphi)}{2} \cong t - \frac{R}{2} \cdot (\varphi_0 - \varphi)^2, \quad (17)$$

где t - глубина шлифования, м; R - радиус обрабатываемой детали, м; φ_0 - угол контакта круга с деталью; φ - текущее значение угла φ_0 .

Углы φ_0 и φ , исходя из приведенной на рис. 4 расчетной схемы, определяются:

$$\varphi_0 = \sqrt{\frac{2t}{R}}, \quad \varphi = \frac{V_{det}}{R} \cdot \tau, \quad (18)$$

где V_{det} - скорость детали, м/с; τ - текущее время, с.

Как следует из зависимости (17), координата \bar{y} связана с параметром φ по квадратичному закону, что сопоставимо с законом синусоиды: $y = t \cdot \sin \frac{\pi \tau}{T}$, где

T - период контакта обрабатываемого элемента с кругом, с. Поэтому для упрощения расчетов с достаточной для практики точностью закон (17) может быть представлен в виде синусоиды, графически показанной на рис. 6.

Используя принципы составления дифференциального уравнения колебаний сосредоточенной массы, имеем

$$c_1 \cdot (\bar{y} - y) - c \cdot y = m \cdot \ddot{y} \quad \text{или} \quad \ddot{y} + k^2 \cdot y = k_1^2 \cdot t \cdot \sin \frac{\pi \tau}{T}, \quad (19)$$

где y - перемещение массы m , м; $(c + c_1) / m = k^2$ и $c / m = k_1^2$.

Для решения полученного дифференциального уравнения применим операционное исчисление и примем нулевые начальные условия:

$$\begin{aligned} y &= \frac{1}{k} \cdot \int_0^T k_1^2 \cdot t \cdot \sin \frac{\pi \tau_1}{T} \cdot \sin k(\tau - \tau_1) \cdot d\tau_1 = \\ &= \frac{k_1^2 \cdot t}{k \cdot \left(\frac{\pi^2}{T^2} - k^2 \right)} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2}{T^2} \cdot \sin^2 kT + \left(\frac{\pi}{T} \cdot \cos kT - k \right)^2} \cdot \sin(k\tau + \alpha). \end{aligned} \quad (20)$$

Полученная зависимость (20) позволяет сделать важный вывод, связанный с тем, что в начальный момент контакта обрабатываемого элемента детали с кругом происходит запаздывание перемещения массы m от действия импульса силы. Об этом свидетельствует присутствие в зависимости (20) множителя $\sin(k\tau + \alpha)$. В силу инерционности системы масса m не успевает среагировать на импульс силы и получить перемещение, соответствующее статическому значению этой силы, т.е. шлифование в начальный период контакта происходит практически без перемещения. Технологическая система в этом случае приобретает как бы свойства, эквивалентные большей приведенной жесткости, что приводит к более глубокому проникновению передней части обрабатываемого элемента детали в рабочую поверхность круга. С одной стороны, это позволяет увеличить интенсивность съема обрабатываемого материала, с другой стороны, это приводит к возможности врезания обрабатываемого элемента в связку круга, ее интенсивному разрушению и повышенному износу круга. В этом случае обрабатываемый элемент, по сути, выполняет роль правящего инструмента, т.е. не круг обрабатывает деталь, а деталь обрабатывает круг. Этим, собственно, и предопределяется чрезвычайно высокий износ круга при шлифовании деталей с прерывистыми поверхностями.

Для оценки интенсивности ударного взаимодействия круга с обрабатываемой деталью обратимся к зависимости (20), принимая в ней $\sin(k\tau + \alpha) = 1$ и устанавливая максимальное значение перемещения y_{max} :

$$y_{max} = \frac{k_1^2 \cdot t}{k \cdot \left(\frac{\pi}{T} - k \right)} \cdot \sqrt{1 + \frac{2 \cdot \frac{\pi}{T} \cdot k \cdot \cos kT}{\left(\frac{\pi}{T} - k \right)^2}}. \quad (21)$$

Анализируя зависимость (21), видим, что при условии $\pi / T = k$ в техноло-

гической системе наступает резонанс. Это свидетельствует о том, что с увеличением скорости вращения детали (что соответствует уменьшению периода контакта круга с обрабатываемым элементом детали T) перемещение y_{max} неограниченно увеличивается и технологическая система переходит в неустойчивое состояние, управлять которым чрезвычайно сложно. Таким образом, увеличение скорости детали, во-первых, увеличивает время запаздывания в момент удара и увеличивает износ круга, во-вторых, приводит технологическую систему в более неустойчивое состояние. Следовательно, для нормального функционирования процесса шлифования (с точки зрения динамической устойчивости процесса и силового воздействия на круг) скорость детали следует уменьшать.

Заслуживает внимания анализ влияния жесткости c_1 (выраженной через k_1) на величину y_{max} . Как следует из зависимости (21), с увеличением c_1 параметр y_{max} увеличивается, а следовательно уменьшается слой связки, который может быть удален (срезан) обрабатываемым элементом детали. В связи с этим представляется целесообразным применение высокопрочных (металлических) связок для алмазных кругов, которые обеспечат в условиях ударного характера взаимодействия детали с кругом снижение его износа, т.к. в этом случае удар будет восприниматься не связкой, а всей рабочей поверхностью круга и в первую очередь режущими зернами. При таких условиях обработки технологическая система успеет среагировать на импульс силы и получить перемещения, достаточные для беспрепятственного перемещения обрабатываемого элемента в слое зерен круга, не касаясь связки.

Исходя из установленного механизма взаимодействия круга с деталью, можно предложить некоторые пути повышения эффективности шлифования прерывистых поверхностей. Во-первых, это применение кругов на высокопрочных металлических связках, обеспечивающих значительную высоту выступания зерен над уровнем связки. Увеличение высоты позволит увеличить время движения обрабатываемого элемента до уровня связки, а следовательно, увеличить перемещения в технологической системе в начальный момент удара и в определенной степени рассеять энергию удара, т.е. как бы перевести весьма неблагоприятные условия обработки прерывистых поверхностей в более приемлемые условия шлифования сплошных поверхностей. Кроме того, увеличение высоты выступания зерен над уровнем связки позволит интенсифицировать линейный съём материала и приведет к уменьшению во времени координаты \bar{y} (т.е. в этом случае появляется возможность съёма материала до того момента, когда он подойдет к уровню связки круга).

Вторым важным условием управления процессом шлифования является установление вполне однозначного соотношения между скоростью детали, скоростью круга и глубиной шлифования, при котором весь подводимый в зону резания материал будет полностью срезан режущими зернами, не доходя до уровня связки. Это обеспечит исключение ударного характера взаимодействия и снижение износа круга. Вполне очевидно, что управлять таким процессом в условиях относительно высоких скоростей детали весьма затруднено, поскольку даже небольшое отклонение какого-либо параметра (например, высоты вы-

ступания зерен над уровнем связки круга и т.д.) от заданного значения приведет к несоблюдению указанного выше условия и повышению износа круга. Исходя из этого, можно сделать вывод о целесообразности ведения процесса шлифования прерывистой поверхности в условиях относительно небольших скоростей вращения детали, применяя при этом новые соотношения параметров режима шлифования.

Используя полученную зависимость (21), может быть предложен еще один путь повышения эффективности шлифования прерывистых поверхностей, связанный с установлением глубины шлифования, не превышающей максимальной высоты выступания зерен над уровнем связки круга. В этом случае, очевидно, обрабатываемый элемент не должен касаться связки круга, т.е. съём материала должен происходить в слое зерен выше уровня связки. Однако, учитывая, что в условиях применения весьма небольших глубин шлифования имеет место многопроходность съёма припуска (21), т.е. полный съём подводимого в зону резания материала происходит не на первом, а на последующих проходах, фактическая глубина шлифования может значительно (в 10 и более раз) превышать номинальную (установленную по лимбу станка) глубину шлифования. Следовательно, предложенный путь интенсификации шлифования менее эффективен по сравнению со вторым.

Таким образом, на основе математического моделирования процесса показано, что наиболее эффективным путем повышения работоспособности круга, работающего в условиях периодического ударного взаимодействия с обрабатываемыми элементами детали, является применение принципиально новых (отличных от традиционных) соотношений параметров режимов шлифования: глубины шлифования, скоростей детали и круга, обеспечивающих полный съём подводимого в зону резания материала на уровне, не превышающем уровня связки.

Необходимо отметить, что условия шлифования прерывистых поверхностей существенно отличаются от условий прерывистого шлифования [4], когда прерывистость контакта круга с деталью позволяет повысить технико-экономические показатели обработки. Эффект в этом случае достигается за счет периодического прерывания контакта и устранения явления теплового насыщения поверхностных слоев обрабатываемой детали, т.е. за счет снижения температуры резания и повышения качества обработки. Реализация условий прерывистого шлифования также предполагает образование на профиле рабочего выступа круга определенного угла атаки к плоскости резания, который способствует более плавному входу зерен в материал, послойному его удалению и основное – рассеиванию энергии удара в момент врезания. Иными словами, при прерывистом шлифовании (за счет самообразования профиля рабочего выступа круга) удар в начальный момент контакта круга с деталью практически отсутствует и износ круга в основном подчиняется закономерностям обычного шлифования сплошных поверхностей. В условиях же шлифования прерывистых поверхностей самоуправление процессом не происходит и поэтому задача повышения эффективности обработки требует иного подхода к управлению процессом шлифования. Как отмечалось выше, для эффективного

ведения процесса шлифования в таких условиях необходимо строго регламентировать глубину внедрения обрабатываемого элемента детали в рабочую поверхность круга, не допуская пересечения траекторией движения вершины обрабатываемого элемента уровня связки и ее интенсивного разрушения. Обрабатываемый материал должен быть полностью удален на определенном уровне высоты рельефа круга, обусловленном прочностными свойствами зерен, связки и обрабатываемого материала.

Список литературы

1. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов. – М. Л.: Машиностроение, 1970. – 315 с.
2. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1985. – 496 с.
3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.7. “Точность обработки деталей машин” – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с.
4. Якимов А.В., Паршаков А.Н. и др. Управление процессом шлифования. – К.: Техніка, 1983. – 182 с.