

$$l_1 + l_2 = \frac{S}{2f} - \sqrt{\frac{S^2}{4f^2} + 8R} \quad (9)$$

Подставляя уравнения (8) и (9) в выражение (7), получим

$$\eta_2 = 1 - \frac{\sqrt{S^2 - 32f^2RY}}{S} \quad (10)$$

Итак, величина относительной опорной площади вибронакатанных поверхностей определяется следующей формулой

$$\eta_2 = \left\{ 1 - 0,5 \left[\frac{6R_{a\text{всх}} - (y_{\text{нн}} + y)}{6R_{a\text{всх}} - R_{p\text{всх}}} \right]^{(S - \frac{R_{a\text{всх}}}{R_{p\text{всх}}})} \right\} \left(1 - \frac{\sqrt{S^2 - 32f^2RY}}{S} \right) \quad (11)$$

Анализ полученных уравнений показывает, что наряду с режимами виброобкатывания значительное влияние на формирование опорной площади поверхности оказывает исходная шероховатость ($R_{a\text{всх}}$, $R_{p\text{всх}}$) и ее физико-механические свойства ($H_{\text{клов}}$, σ_T). Это указывает на то, что технологическое управление эксплуатационными свойствами деталей машин при их вибронакатывании можно осуществлять не только за счет варьирования режимов окончательной обработки, но и за счет изменения качества исходной поверхности.

Экспериментальная проверка полученных зависимостей дала удовлетворительные результаты.

Л и т е р а т у р а

1. Шнейдер Ю.Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. М., "Машиностроение", 1972.
2. Рыжов Э.В., Суслов А.Г. К вопросу определения опорных площадей. В сб.: Технология машиностроения. Брянск, 1973.
3. Рыжов Э.В., Суслов А.Г. К вопросу теоретического определения сближения контактирующих поверхностей. Материалы научно-технического семинара: Контактная жесткость в машиностроении и приборостроении. Севастополь, 1973.

Ф.П. Урывский, Е.М. Маркушин, Г.П. Баладин

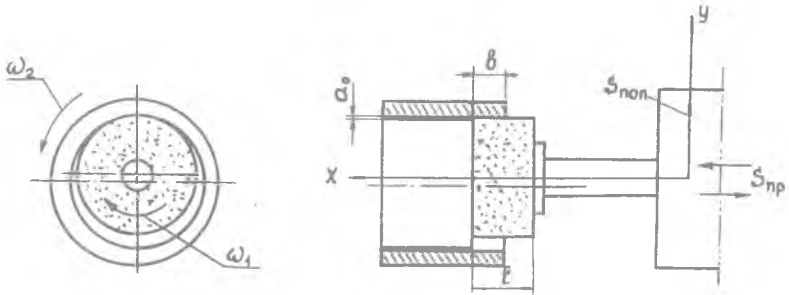
ВИБРАЦИИ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ШЛИФОВАНИИ И ВОЛНИСТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Одним из показателей искажения профиля изделия является волнистость обработанной поверхности [1], [2]. Наибольшее влияние на

волнистость оказывают радиальные колебательные перемещения шлифовального круга в направлении поперечной подачи [3] - [5].

К основным причинам возникновения указанных вибрационных движений следует отнести установочный эксцентриситет круга, отклонения его геометрии, биение детали относительно оси вращения, наследственные неровности обрабатываемой детали, а также вторичное возбуждение колебаний при работе по следу.

Для установления влияния указанных факторов на волнистость обработанной поверхности обратимся к схеме процесса внутреннего шлифования (рис. I).



Р и с. I. Схема процесса внутреннего шлифования

Пусть a_0 - заданная глубина шлифования, мм; t - высота круга, мм; b - продольная подача на оборот детали, мм;
 $\sigma = \frac{b}{t}$ - коэффициент перекрытия, для чистового шлифования обычно принимается

$$0,25 \leq \sigma \leq 0,5.$$

Сила взаимодействия инструмента и детали вдоль оси Y (радиальная составляющая силы резания) может быть представлена следующим образом

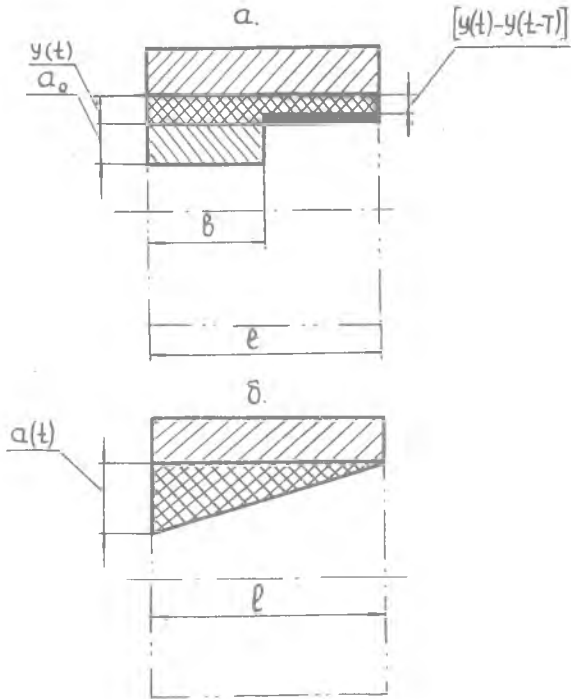
$$P_y = K a(t), \quad (I)$$

где K - коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала, режимов обработки и других факторов;

$a(t)$ - миделевое сечение срезаемого слоя в направлении поперечной подачи в момент времени t .

При условии $\sigma = 0,5$ и без учета отжима инструмента и износа

круга сечение $a(t)$ может быть представлено схемой, приведенной на рис. 2,а. Тогда, в соответствии с равенством (I), для составляющей силы резания P_y получим следующее аналитическое выражение:



Р и с.2. Сечение срезаемого слоя

$$P_y = K \begin{cases} \delta [a_0 + y(t)] + (\ell - \delta) [y(t) - y(t-T)] \\ \text{при } a_0 + y(t) \geq 0, y(t) - y(t-T) \geq 0; \\ \delta [a_0 + y(t)] \text{ при } a_0 + y(t) \geq 0, y(t) - y(t-T) < 0; \\ 0 \text{ при } a_0 + y(t) < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где a_0 — заданная глубина шлифования; $y(t)$ — добавочная переменная глубина шлифования от вибрационного перемещения круга; $y(t-T)$ — величина, учитывающая влияние следа, оставленного кругом в течение предшествующего оборота детали; T — время поворота детали на I оборот; t — время, с

В соответствии с принципом Даламбера для описания вибрационных движений инструмента по отношению к изделию получим дифференциально-разностное уравнение

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \eta \frac{dy(t)}{dt} + cy(t) + P_y = 0, \quad (3)$$

где сила P_y определена равенством (2); m — приведенная масса круга и оправки; η — коэффициент сопротивления; c — коэффициент жесткости.

Так как в соответствии с равенством (2) дифференциально-разностное уравнение (3) нелинейное, то для исследования решений этого уравнения необходимо привлекать как специальные математические методы, так и ЭЦМ. Для упрощения задачи сечение среза, приведенное на рис. 2, а можно представить в виде треугольника (см. рис. 2, б), считая, что глубина шлифования по высоте круга в направлении продольной подачи изменяется равномерно. Тогда для силы P_y получим следующее выражение:

$$P_y = \begin{cases} B\ell [a_0 + y(t) - y(t-T)] \\ \text{при } [a_0 + y(t) - y(t-T)] \geq 0, \\ 0 \text{ при } [a_0 + y(t) - y(t-T)] < 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $B = K\alpha$, а α — коэффициент, учитывающий равенство площадей сечений срезов по схемам а и б (см. рис. 2).

Предположим, что процесс шлифования происходит без отрывов круга от изделия. Это возможно, если амплитуда вибраций достаточно мала. Тогда, в соответствии с равенством (3), вибрационные движения шлифовального круга по отношению к обрабатываемой детали могут быть описаны линейным дифференциально-разностным уравнением

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \eta \frac{dy(t)}{dt} + cy(t) + \beta [a_0 + y(t) - y(t-T)] = 0, \quad (5)$$

где $\beta = B\ell$

Полученные уравнения позволяют выяснить влияние различных возмущающих факторов на интенсивность вибраций и волнистость обработанной поверхности. Так, например, если шлифовальный круг установлен с эксцентриситетом ε , то глубина шлифования без учета вибрационных движений инструмента будет определена равенством

$$a_0 = a_0 - \varepsilon \sin \omega, t, \quad (6)$$

где a_0 - заданная глубина шлифования при отсутствии эксцентриситета установки круга; ω , - угловая скорость круга.

Тогда, учитывая равенство (6) в выражениях (2), (5) и используя ЭЕМ, можно выяснить влияние эксцентриситета установки круга на интенсивность вибраций и волнистость обработанной поверхности.

В табл. приведены конкретные параметры процесса шлифования и расчетное значение амплитуды вибраций F_0 .

Т а б л и ц а

Режим шлифования и расчетное значение амплитуды вибраций

$V_0,$ $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	$\varepsilon_0,$ мм	C_0 $\frac{\text{кг}}{\text{мм}}$	$m_{0,2}$ $\frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{мм}}$	$\omega_0,$ $\frac{1}{\text{с}}$	$T_0,$ с	$Z_0,$ $\frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{мм}}$	$F_0,$ мм
60	20	500	$1 \cdot 10^{-4}$	750	0,1	0,3	0,0034

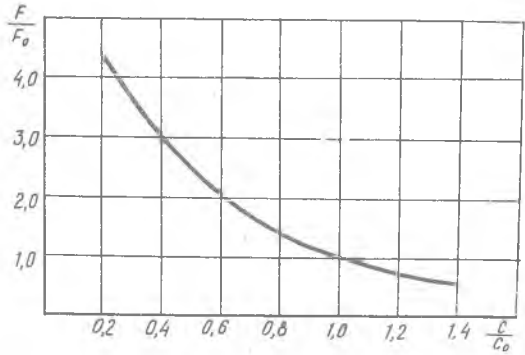
Изменение значений параметров, указанных в табл. ведет к изменению амплитуды вибраций F и волнистости обработанной поверхности.

Используя полученные дифференциально-разностные уравнения, которые описывают вибрационные движения шлифовального круга в процессе его работы, найдены зависимости относительной величины $\frac{F}{F_0}$ от технологических параметров и характеристик упругой системы. При этом при изменении одного из параметров остальные полагались равными значениям, указанным в табл.

На рис.3 показана зависимость $\frac{F}{F_0}$ от изменения жесткости системы. Как видно из рис.3, с увеличением жесткости амплитуда вынужденных колебаний уменьшается по закону гиперболы.

На рис.4 представлена зависимость $\frac{F}{F_0}$ от величины приведенной массы круга и вращающейся части шлифовального шпинделя, при различных величинах жесткости системы. Из рисунка видно, что для каж-

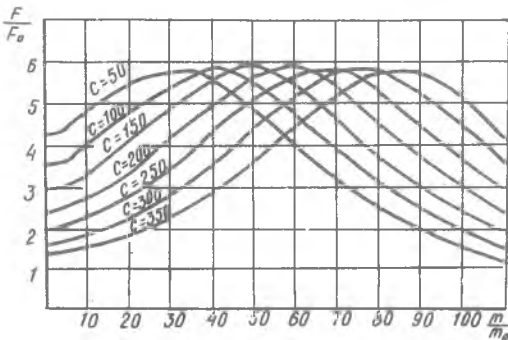
Р и с.3. Влияние жесткости системы СПИД на амплитуду вибраций



того значения коэффициента жесткости "С" имеется одно и то же максимальное значение $\frac{F}{F_0}$ при неизменных остальных параметрах,

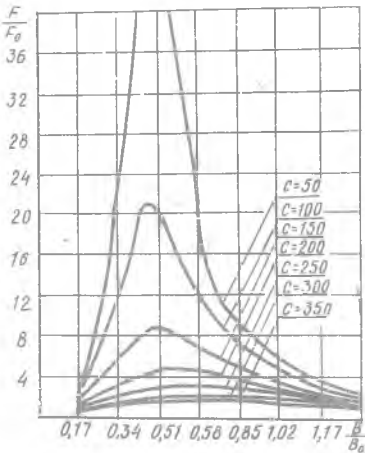
причем с увеличением жесткости происходит смещение этого максимума в сторону больших отношений $\frac{m}{m_0}$. Таким образом, при определенной жесткости системы существует такая приведенная масса, при которой величина колебаний шлифовального круга относительно детали будет максимальной.

На рис.5 приведена зависимость $\frac{F}{F_0}$ от соотношения $\frac{B}{B_0}$ при $\frac{m}{m_0} = 1$, для различных значений величин жесткости. Характер изменения $\frac{F}{F_0}$ в данном случае свидетельствует о наличии такого соот-



Р и с.4. Влияние величины приведенной массы на амплитуду

ношения $\frac{B}{B_0}$, при котором значение амплитуды колебаний является максимальным.



Р и с. 5. Влияние изменения коэффициента В на амплитуду при различных значениях жесткости системы

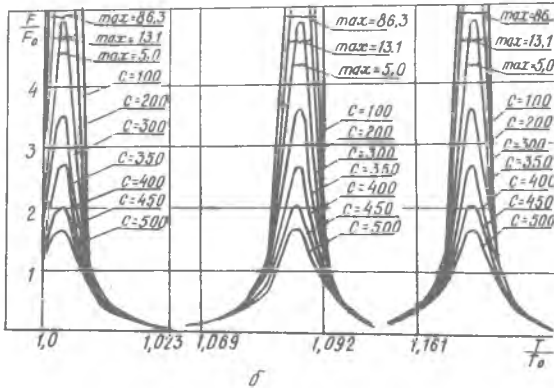
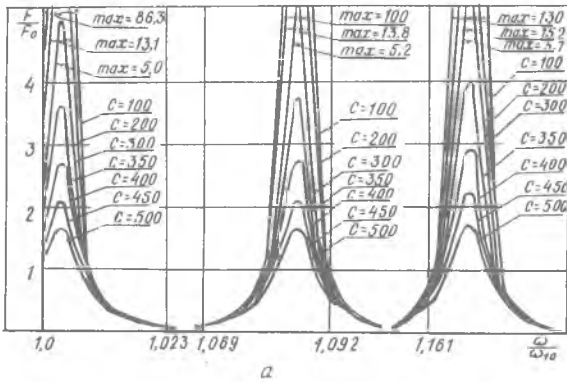
На рис. 6 показано изменение $\frac{F}{F_0}$ при увеличении угловой скорости круга ω_1 и времени поворота детали на один оборот - T для различных значений жесткости. Как видно из рисунка, характер зависимостей $\frac{F}{F_0 T}$ от соотношений $\frac{\omega_1}{\omega_{10}}$ и $\frac{T}{T_0}$ одинаков, однако величины максимальных значений $\frac{F}{F_0}$ при изменении $\frac{\omega_1}{\omega_{10}}$ (см. рис. 6, а) растут с увеличением угловой скорости, в то время как при изменении $\frac{T}{T_0}$ максимальные значения $\frac{F}{F_0}$ остаются постоянными (см. рис. 6, б).

Величина амплитуды колебаний зависит также от коэффициента сопротивления γ . На рис. 7 показана зависимость $\frac{F}{F_0}$ от $\gamma, / \rho_0$ для различных значений жесткости. Существует определенное значение коэффициента сопротивления, при котором амплитуда колебаний будет максимальной при любых значениях "С", но величина максимума будет зависеть от величины жесткости.

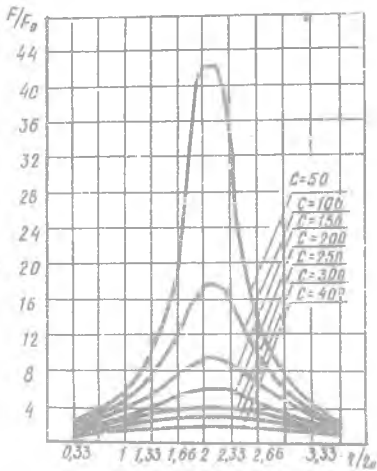
На рис. 8 приведена зависимость $\frac{F}{F_0}$ от соотношения $\frac{B}{B_0}$ для различных коэффициентов сопротивления γ . Из рисунка видно, что при малых величинах $\frac{B}{B_0}$ влияние коэффициента сопротивления на амплитуду колебаний мало. При увеличении этого соотношения различие в коэффициентах значительно сказывается на величине $\frac{F}{F_0}$. Эта зависимость также имеет максимум при определенном соотношении $\frac{B}{B_0}$.

Вывод

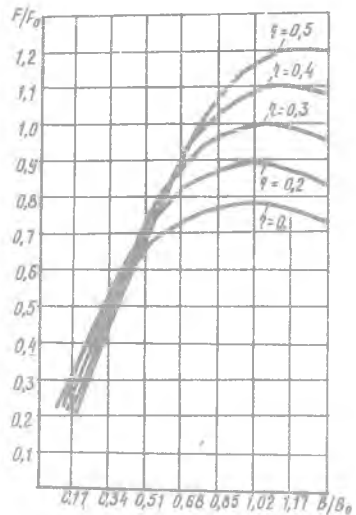
При назначении режимов шлифования можно найти такие соотношения параметров жесткости, приведенной массы, скоростей враще-



Р и с. 6. Зависимость амплитуды вибраций от изменений угловой скорости шлифовального круга (а) и времени одного оборота детали (б)



Р и с. 7. Влияние коэффициента сопротивления на амплитуду



Р и с. 8. Влияние изменения коэффициента B на амплитуду вибраций для различных значений коэффициента сопротивления

ния детали и круга, а также поперечной подачи, при которых для каждого материала амплитуда колебаний инструмента относительно детали будет минимальной и, соответственно, можно получить минимальную волнистость обработанной поверхности.

Л и т е р а т у р а

1. У р ь в с к и й Ф.П., К о р о т и н Б.С., Б а р в и н о к В.А. Применение кругов из синтетических алмазов при шлифовании жаропрочных, конструкционных сталей и титановых сплавов. Материалы научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В.И. Ленина. Куйбышев, 1970.
2. Ж а р к о в И.Г., М а р к у ш и н Е.М. Теоретическое исследование вибраций при резании металлов. (Построение математической модели процесса). В сб.: Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов. Куйбышев, 1973.

3. Кудин В.А. Динамика станков. М., "Машиностроение", 1967.
4. Кучма Л.К. Учет сил сопротивления в автоколебательной системе деталь-станок-инструмент. В сб.: Исследование колебаний металлорежущих станков при резании металлов. М., Машгиз, 1958.
5. Колле К.С. Точность обработки и режимы резания. М., "Машиностроение", 1968.

Е.В. Бурмистров, Е.М. Маркушин, А.В. Тарасов

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ
МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ В ДЕТАЛЯХ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ
И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Одной из наиболее сложных и трудоемких технологических операций при обработке жаропрочных и титановых сплавов является сверление отверстий малых диаметров (1-5 мм). Недостаточная жесткость и виброустойчивость таких сверл способствует возникновению высокочастотных автоколебаний, что приводит к снижению прочности и стойкости инструмента и производительности процесса сверления. Известно, что при сверлении жаропрочных и титановых сплавов более 60% сверл малых диаметров выходит из строя вследствие поломок, что зачастую приводит к браку дорогостоящих деталей.

В процессе работы на сверло со стороны обрабатываемого материала действует пространственная система сил, которую можно привести к осевой силе, крутящему моменту и избыточной радиальной силе. Переменность указанных сил и моментов, вызванная различными факторами, способствует возникновению осевых, крутильных и изгибных колебаний сверла. Наибольшее влияние на стойкость и прочность сверл оказывают крутильные колебания, приводящие к значительным изменениям скорости резания и подачи, интенсивному износу и усталостному разрушению сверл.

Для анализа крутильных колебаний сверл была разработана математическая модель на основе использования нелинейного дифференциально-разностного уравнения с запаздывающим аргументом. К основным факторам, приводящим к возникновению и развитию колебаний, можно отнести изменение толщины среза, обусловленное крутильными колебаниями