УДК 658.516.3:621

Виброакустическая диагностика процесса алмазного выглаживания[1]

В. Л. Заковоротный, М. М. Ханукаев
(Донской государственный технический университет)

Рассматривается проблема настройки динамической системы алмазного выглаживания на основе контроля сигнала виброакустической эмиссии сопровождающей процесс обработки. Предлагаются уравнения динамики, на основе анализа которых показано, что изменения градиентных физико-механических свойств на поверхности обрабатываемой заготовки приводят к изменениям спектрального состава сигнала виброакустической эмиссии. На основе этого предлагается способ настройки технологической системы по динамическим параметрам. Он позволяет выбрать рациональные значения усилия прижима алмазного наконечника к обрабатываемой детали. Теоретически, на основе анализа частотных свойств динамической системы процесса выглаживания, показано, что по мере сближения наконечника инструмента с заготовкой происходит изменение градиента физико-механических свойств процесса. В результате при анализе уравнения в вариациях наблюдается изменение спектрального состава колебаний. Теоретические представления подтверждаются экспериментальными исследованиями вибрационных характеристик процесса.
Ключевые слова: *процесс алмазного выглаживания, виброакустическая диагностика, качество.*

Введение. Методы обработки деталей поверхностным пластическим деформированием достаточно распространены. Они позволяют управлять шероховатостью поверхности, остаточными напряжениями в поверхностном слое и их распределением, микротвёрдостью и её распределением в приповерхностном слое и др. В результате изменяется износостойкость деталей, контактная выносливость, коррозионная стойкость и др. [1, 2]. В этом случае в приповерхностном слое детали формируются функционально-градиентные структуры, которые существенно влияют на её эксплуатационные свойства. Они могут существенно их улучшать и ухудшать. Всё зависит от схемы, геометрии инструмента и режимов обработки. Одним из распространённых методов поверхностно-пластической обработки является процесс алмазного выглаживания [2]. В зависимости от исходной шероховатости, физико-механических свойств поверхности и пр. меняется эффективность этого процесса. В статье ставится задача и предлагаются решения для выбора режимов выглаживания алмазными инструментами на основе анализа сигнала виброакустической эмиссии, сопровождающей процесс обработки.

Математическое моделирование динамики процесса выглаживания. Схема процесса приведена на рис. 1. Необходимо учитывать, что технологический процесс формируется в результате взаимодействия подсистем инструмента и обрабатываемой детали через динамическую связь, которая образуется в области контактирования алмазного наконечника и детали. Эта схема соответствует процессу трения индентора с образцом, который достаточно подробно рассмотрен в работах [3, 4]. Там же показано, что упругие и диссипативные свойства подсистемы со стороны инструмента после предварительной нагрузки в вариациях относительно точки равновесия могут быть схематизированы в линейном приближении в виде матриц скоростных коэффициентов и упругости. Эти матрицы являются симметричными, положительно определёнными. Более того, угол ориентации α коллинеарных направлений деформационных смещений совпадает с углом ориентации коллинеарных осей γ_1 и γ_2 скоростных коэффициентов. В этом случае, если заданы внешние силы $F(t)=\{F_1(t),F_2(t)\}^T$, то уравнение упругих деформаций алмазного наконечника выглаживающего инструмента можно представить в виде

[1] Работа выполнена по теме № 2.17.13 в рамках выполнения госзадания Минобрнауки России в части НИР.

$$m\frac{d^2X}{dt^2}+h\frac{dX}{dt}+cX=F(t), \tag{1}$$

где $X(t)=\{X_1(t),X_2(t)\}^T$ — вектор упругих деформационных смещений; $m=\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}$, $h=\begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} \\ h_{1,2} & h_{2,2} \end{bmatrix}$, $c=\begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} \\ c_{1,2} & c_{2,2} \end{bmatrix}$ — соответственно матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов.

Угол ориентации коллинеарных осей с учётом высказанных выше особенностей равен (рис. 1, *a*)

$$\alpha=\frac{1}{2}\operatorname{arctg}\left(\frac{2c_{1,2}}{(c_{2,2}-c_{1,1})}\right) \tag{2}$$

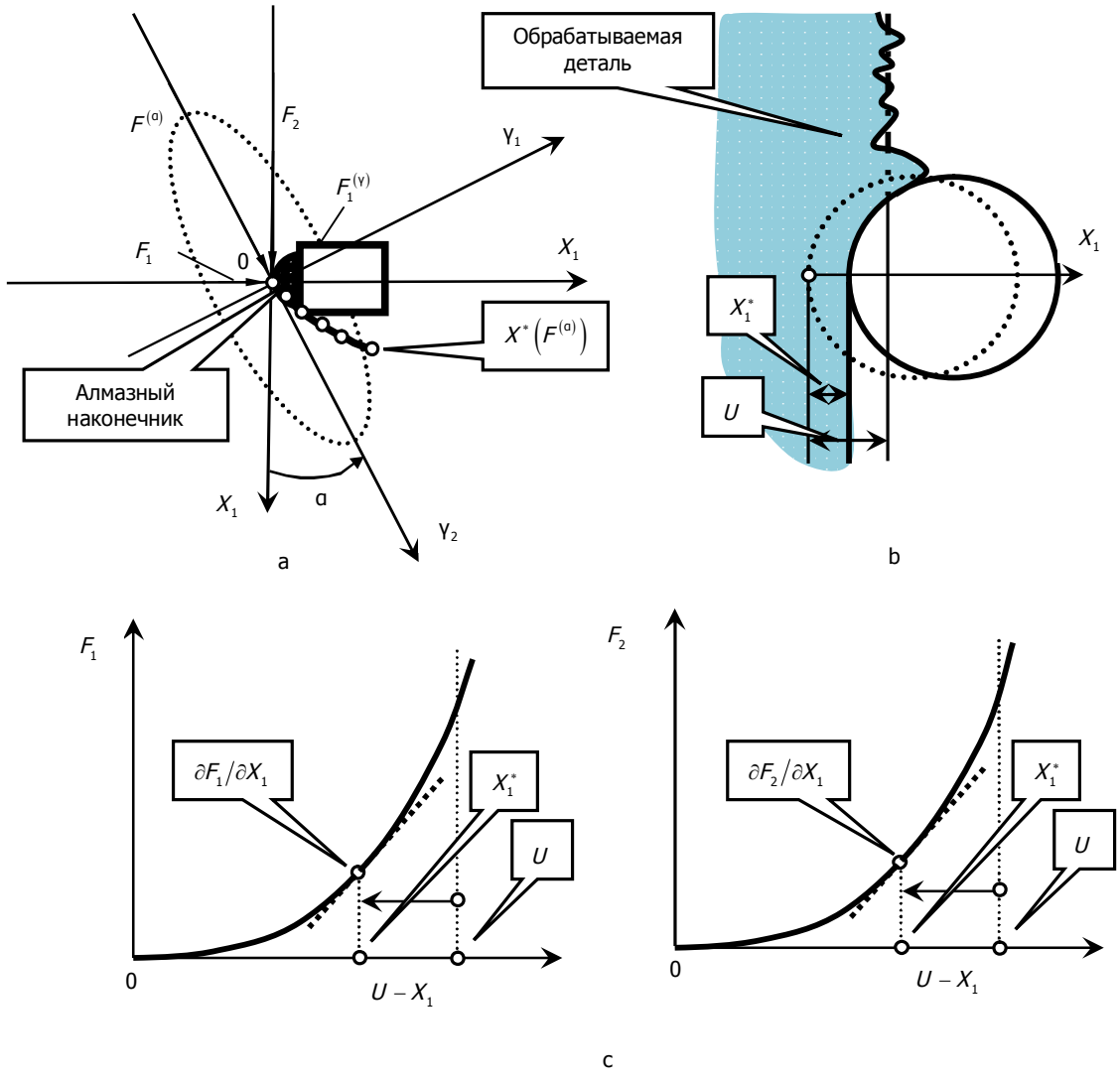

Рис. 1. Система динамической модели: a — координаты, в которых отсчитывается упругое деформационное смещение вершины инструмента и внешние силы; b — схема формирования поверхности выглаживания; c — F1 и F2 — функции сближения алмазного наконечника с обрабатываемой поверхностью

Для раскрытия особенностей динамики процесса выглаживания необходимо силы $F(t)=\{F_1(t),F_2(t)\}^T$ представить в координатах состояния $X(t)=\{X_1(t),X_2(t)\}^T$. При этом необходимо учесть две главных особенности зависимости сил от координат состояния: они увеличиваются при возрастании внедрения алмазного наконечника в обрабатываемую поверхность (рис. 1, *b*, *c*); имеет место запаздывание изменения сил по отношению к вариациям внедрения «$U-X_1$», зависящее от точки равновесия X^*. Причём, запаздывание определяется объёмом пластической деформации материала, приходящимся на единицу пути инструмента. Это путь, потраченный на пластическую деформацию. Поэтому запаздывание зависит от скорости резания. Кроме этого, в процессе внедрения имеет место перераспределение составляющих сил резания. Поэтому величины запаздывания по отношению к силам F_1 и F_2 различны.

Зависимость установившихся значений сил от внедрения (рис. 1, *c*) в дальнейшем будем называть функциями сближения. С учётом отмеченных выше особенностей уравнения динамики процесса выглаживания в развёрнутом виде можно представить в виде следующей системы

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2X_1}{dt^2}+h_{1,1}\dfrac{dX_1}{dt}+h_{2,1}\dfrac{dX_2}{dt}+c_{1,1}X_1+c_{2,1}X_2=F_1(U-Y_1)+f_1(t); \\ m\dfrac{d^2X_1}{dt^2}+h_{1,2}\dfrac{dX_1}{dt}+h_{2,2}\dfrac{dX_2}{dt}+c_{1,2}X_1+c_{2,2}X_2=F_2(U-Y_2)+f_2(t); \\ T_1\dfrac{dY_1}{dt}+Y_1=X_1; \\ T_2\dfrac{dY_2}{dt}+Y_2=X_1, \end{cases} \tag{3}$$

где T_1, T_2 — запаздывающие аргументы, моделирующие запаздывания сил в виде апериодических звеньев; $f_1(t)$, $f_2(t)$ — силовой шум процесса, определяющий возмущённое движение системы относительно своего стационарного состояния.

Будем анализировать стационарное состояние системы, которое характеризуется: $d^2X_1/dt^2=dX_1/dt=d^2X_2/dt^2=dX/dt=dY_1/dt=dY_2/dt=0$, $U=const$, $f_1(t)=f_2(t)=0$. Тогда координаты точки равновесия определяются из системы

$$\begin{cases} c_{1,1}X_1^*+c_{2,1}X_2^*=F_1(U-X_1^*); \\ c_{1,2}X_1^*+c_{2,2}X_2^*=F_2(U-X_1^*), \end{cases} \tag{4}$$

где X_1^*, X_2^* — координаты точки равновесия. Тогда возмущённое движение системы в вариациях относительно точки равновесия X_1^*, X_2^* определяется следующим линеаризованным уравнением в вариациях

$$m\frac{d^2x}{dt^2}+h_\Sigma\frac{dx}{dt}+c_\Sigma x=f(t), \tag{5}$$

где $x=\{x_1(t),x_2(t)\}^T$ — вектор вариаций упругих деформационных смещений относительно точки равновесия X_1^*, X_2^*; $h_\Sigma=\begin{bmatrix} h_{1,1}-T_1\dfrac{\partial\varphi_1}{\partial x_1} & h_{2,1} \\ h_{1,2}-T_2\dfrac{\partial\varphi_2}{\partial x_1} & h_{2,2} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} h_{1,1,\Sigma} & h_{2,1} \\ h_{1,2,\Sigma} & h_{2,2} \end{bmatrix}$ — суммарная матрица

скоростных коэффициентов; $c_{\Sigma} = \begin{bmatrix} c_{1,1} + \dfrac{\partial \varphi_1}{\partial x_1} & c_{2,1} \\ c_{1,2} + \dfrac{\partial \varphi_2}{\partial x_1} & c_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{1,1,\Sigma} & c_{2,1} \\ c_{1,2,\Sigma} & c_{2,2} \end{bmatrix}$ — суммарная матрица жёсткости, учитывающая реакцию со стороны процесса выглаживания; $X(t) = X^* + x(t)$, $\varphi_1\left(x_1, T_1 \dfrac{dx_1}{dt}\right)$, $\varphi_2\left(x_1, T_2 \dfrac{dx_1}{dt}\right)$ — нелинейные функции, рассматриваемые в вариациях относительно точки равновесия. Они обладают свойствами:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1} < 0,\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_1} < 0,\ \varphi_1(0,0) \equiv 0,\ \varphi_2(0,0) \equiv 0.$$

В матрицах h_{Σ} и c_{Σ} приняты во внимание знаки при $\dfrac{\partial \varphi_1}{\partial x_1}$ и $\dfrac{\partial \varphi_2}{\partial x_1}$.

Рассмотрим спектральные характеристики колебаний алмазного наконечника выглаживающего инструмента. Для этого примем во внимание, что силовой шум, задаваемый функциями $f_1(t)$, $f_2(t)$ в рассматриваемом частотном диапазоне, является широкополосным и его можно представить в виде белого шума, отличающегося коэффициентом k. Тогда из (5) получаем выражения для автоспектров $S_{X_1,X_1}(\omega)$, $S_{X_2,X_2}(\omega)$ колебательных смещений алмазного наконечника в двух ортогональных направлениях

$$\begin{aligned} S_{X_1,X_1}(\omega) &= \left| \frac{mp^2 + \left(h_{2,2} - kh_{2,1}\right)p + c_{2,2} - kc_{2,1}}{\left(mp^2 + h_{1,1,\Sigma}p + c_{1,1,\Sigma}\right)\left(mp^2 + h_{2,2}p + c_{2,2}\right) - \left(h_{1,2,\Sigma}p + c_{1,2,\Sigma}\right)\left(h_{2,1}p + c_{2,1}\right)} \right|^2, \\ S_{X_2,X_2}(\omega) &= \left| \frac{kmp^2 + \left(kh_{1,1,\Sigma} - h_{1,,2,\Sigma}\right)p + kc_{1,1,\Sigma} - c_{1,2,\Sigma}}{\left(mp^2 + h_{1,1,\Sigma}p + c_{1,1,\Sigma}\right)\left(mp^2 + h_{2,2}p + c_{2,2}\right) - \left(h_{1,2,\Sigma}p + c_{1,2,\Sigma}\right)\left(h_{2,1}p + c_{2,1}\right)} \right|^2, \end{aligned} \tag{6}$$

где $p = j\omega$.

Анализ (6) показывает, что по мере сближения алмазного наконечника с обрабатываемой поверхностью имеет место изменение градиентов $\dfrac{\partial \varphi_1}{\partial x_1}$ и $\dfrac{\partial \varphi_2}{\partial x_1}$. Это отображается в изменениях основных частот колебательных смещений, избираемых динамической системой. Например, если обеспечить конструкцию выглаживающего инструмента такой, что в рассматриваемом частотном диапазоне исходные матрицы скоростных коэффициентов и упругости подсистемы инструмента являются диагональными, то

$$\begin{aligned} S_{X_1,X_1}(\omega) &= \left| \frac{1}{\left(mp^2 + h_{1,1,\Sigma}p + c_{1,1,\Sigma}\right)} \right|^2, \\ S_{X_2,X_2}(\omega) &= \left| \frac{kmp^2 + \left(kh_{1,1,\Sigma} - h_{1,2,\Sigma}\right)p + kc_{1,1,\Sigma} - c_{1,2,\Sigma}}{\left(mp^2 + h_{1,1,\Sigma}p + c_{1,1,\Sigma}\right)\left(mp^2 + h_{2,2}p + c_{2,2}\right)} \right|^2, \end{aligned} \tag{7}$$

тогда по смещению частоты основного осциллятора можно вычислить градиент $\dfrac{\partial \varphi_1}{\partial x_1}$, с которым непосредственно связан градиент физико-механических свойств приповерхностной области формируемой в процессе выглаживания. Из (7) вытекает

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1} = m\left[\left(\Omega_{1,\Sigma}\right)^2 - \left(\Omega_1\right)^2\right], \tag{8}$$

где Ω_1 — собственная частота исходной системы без процесса выглаживания; $\Omega_{1,\Sigma}$ — собственная частота системы в процессе выглаживания. Таким образом, по смещению частоты основного осциллятора динамической системы можно оценить градиент функции $\frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1}$, и, следовательно, градиент физико-механических свойств формируемой поверхности детали.

В реальных инструментах для выглаживания поверхностей динамические свойства инструментов являются более сложными. Они обладают свойством пространственной дискретной избирательности. Однако изменение динамической жёсткости процесса вызывает смещение частот основных осцилляторов наблюдаемой вибрационной последовательности. Причём, в вибрационной последовательности $x_1(t)$ в большей степени отображаются свойства $\frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1}$, а в последовательности $x_2(t)$ — свойства $\frac{\partial \varphi_2}{\partial x_1}$. Причём, как это следует из (8), для оценивания $\frac{\partial \varphi_2}{\partial x_1}$ более информативны значения не резонансов, а антирезонансов.

Экспериментальные исследования частотных свойств сигнала виброакустической эмиссии. Обычно при технологической настройке рассматриваемого процесса обеспечивается рациональное значение силы, формируемой в процессе выглаживания. Для этого в инструменте между наконечником и корпусом устанавливается упругий элемент, деформационные смещения которого интерпретируются как силы контактного взаимодействия. В зависимости от физико-механических свойств материала, свойств его поверхности (например, шероховатости) устанавливается рациональное значение силы прижима. Для определения величины рациональной силы прижима традиционно выполняются предварительные исследования зависимости выходных параметров поверхности и приповерхностного слоя в зависимости от технологических режимов, прежде всего — от усилия прижима. Однако и в этом случае не учитываются вариации свойств исходной поверхности обрабатываемой детали. Как отмечено выше, одному и тому же предварительному деформационному смещению $U = const$ могут соответствовать различные установившиеся деформации (в нашей интерпретации точки равновесия X_1^*, X_2^*). Точкам же равновесия соответствуют различные условия обработки, во многом зависящие от градиентов функций сближения по деформационным смещениям. Измерение свойств сигнала виброакустической эмиссии позволяет обеспечить настройку технологической системы по объективным параметрам, характеризующим состояние формируемой поверхности. Для этого рассмотрим наиболее важные экспериментальные данные по изменениям свойств вибрационных характеристик при варьировании усилия прижима наконечника.

На рис. 2 приведены примеры изменения автоспектров колебательных ускорений в зависимости от усилий прижима. Колебательные ускорения измерялись с помощью виброакселерометров, установленных на инструменте в двух ортогональных направлениях. Идентифицированные параметры динамической подсистемы инструмента приведены в таблице 1.

Таблица 1

Идентифицированные параметры динамической подсистемы инструмента

Матрица инерционных коэффициентов $\left[\frac{кг \cdot с^2}{мм}\right]$	Матрица диссипации $\left[\frac{кг \cdot с}{мм}\right]$	Матрица упругости $\left[\frac{кг}{мм}\right]$
$\begin{bmatrix} 1{,}1 \cdot 10^{-3} & 0 \\ 0 & 1{,}1 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0{,}80 & 0{,}03 \\ 0{,}03 & 0{,}32 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 500 & 17 \\ 17 & 200 \end{bmatrix}$

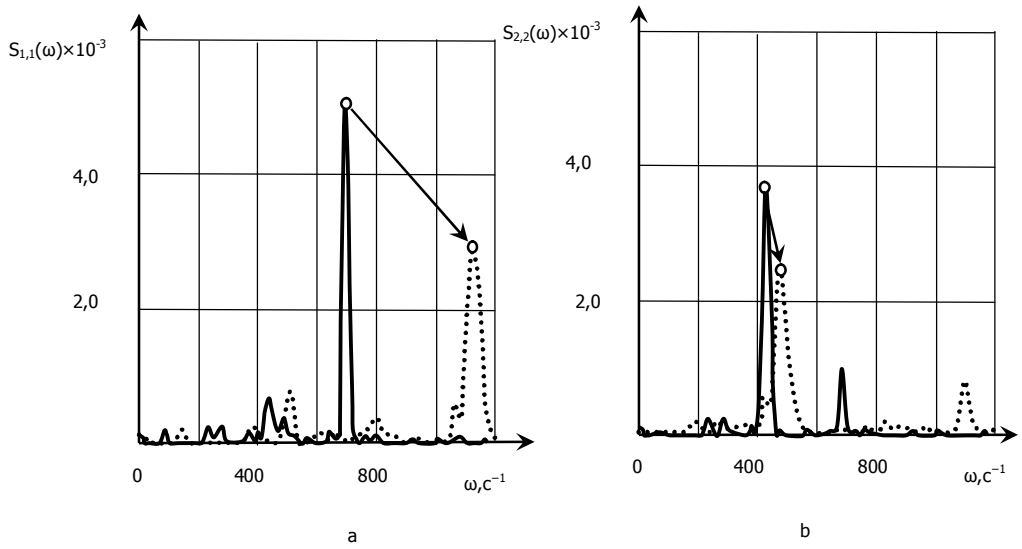

Рис. 2. Типичный пример нормированных к дисперсии автоспектров сигнала виброакустической эмиссии: a — в направлении x_1; b — в направлении x_2

Спектральные характеристики (рис. 2) определялись на основе оценивания корреляционных функций и их Фурье — изображений. На приведённой диаграмме дано сравнение двух автоспектров. Один (сплошные линии) соответствует предварительному смещению вершины наконечника, при котором установившееся значение нормальной составляющей силы равно 2,0 кг. Второй (точечные линии) — значение нормальной составляющей силы равно 25,0 кг. Прежде всего, обращает на себя внимание существенная чувствительность смещения основной частоты колебательных смещений в нормальном к поверхности детали направлении. Кроме этого, наблюдается уширение спектральной линии колебательных смещений. Однако более наглядную картину дают данные по авторегрессионному спектральному анализу (АРС), и, прежде всего, по диаграмме распределения корней характеристического полинома АРС модели в комплексной плоскости (рис. 3). Методика построения таких диаграмм подробно изложена в работах [3, 4]. На приведённых диаграммах показаны смещения центров группирования корней АРС моделей и их 95 %-й разброс (затемнённые эллипсы распределения относительно центров группирования).

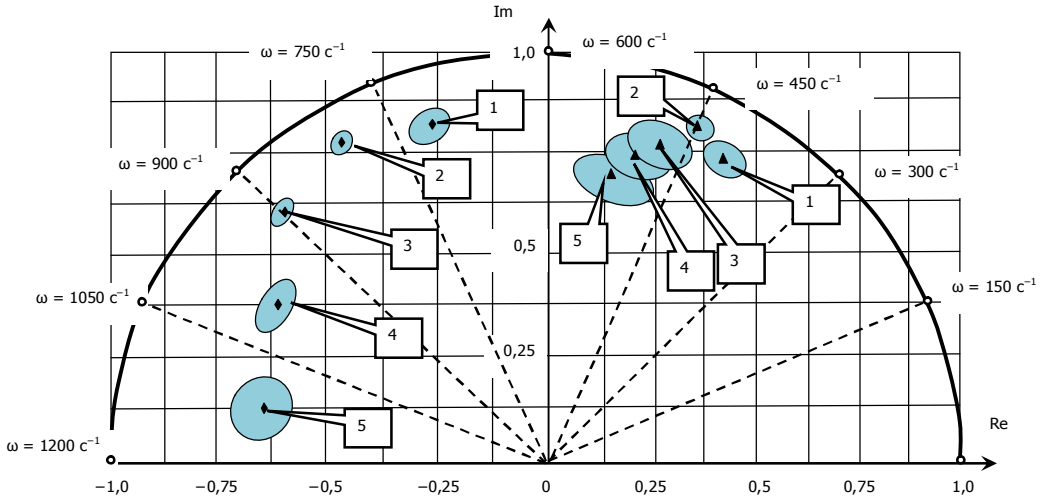

Рис. 3. Смещения корней характеристического полинома АРС модели по мере увеличения внедрения инструмента в заготовку. Нормальные составляющие сил равны: 1 — 2 кг; 2 — 5 кг; 3 — 10 кг; 4 — 17 кг; 5 — 25 кг

Отметим следующие наиболее важные результаты экспериментальных исследований.

1) По мере увеличения внедрения алмазного наконечника в заготовку изменяется частотный состав наблюдаемых вибрационных смещений инструмента. При этом отмечается две явно выраженных тенденции. Во-первых, частоты основных осцилляторов колебательных ускорений смещаются в высокочастотную область, что свидетельствует об увеличении динамической жёсткости, формируемой процессом выглаживания. Во-вторых, наблюдается изменение спектральной линии основных осцилляторов. По мере увеличения внедрения вначале наблюдается сужение спектральной линии основных осцилляторов, при этом уменьшается общий уровень сигнала виброакустической эмиссии. Затем наблюдается заметное её уширение. С уширением спектральной линии коррелирует расширение эллипсов рассеяния корней характеристического полинома АРС моделей в комплексной области.

2) Смещения частот основных осцилляторов зависят от формы колебательных смещений. Наибольшей чувствительностью изменения частоты от внедрения алмазного наконечника обладает колебательный контур, образуемый подсистемой нормальных к поверхности заготовки колебаний. Назовём частоту этого осциллятора «частотой нормальных колебаний».

3) Изучение изменения свойств поверхности во взаимосвязи со свойствами сигнала виброакустической эмиссии показывает, что по мере внедрения алмазного наконечника в обрабатываемую деталь имеет место рациональное значение динамической жёсткости процесса в направлении, нормальном к формируемой поверхности. При этом в смещении частоты осциллятора нормальных колебаний отображаются градиентные физико-механические свойства в приповерхностной области. В общем уровне колебательных смещений отображаются характеристики формируемого микрорельефа. Поэтому на основе оценивания девиации частоты и общего уровня колебательных смещений, измеренных, например, с помощью пьезоэлектрического виброакселерометра, можно оценивать основные показатели качества формируемой поверхности.

Заключение. Теоретически обосновано и экспериментально проверено существование оптимальных значений градиентов сил по внедрению алмазного наконечника в обрабатываемую деталь. Измерение свойств сигнала виброакустической эмиссии позволяет обеспечить настройку технологической системы по объективным параметрам, характеризующим состояние формируемой поверхности. По смещению частот основных осцилляторов сигнала виброакустической эмиссии можно определять величину внедрения алмазного наконечника в деталь, при котором формируется поверхность, имеющая требуемые значения градиентов физико-механических свойств в приповерхностной области. По общему уровню сигнала можно оценивать значение формируемой шероховатости. В зависимости от исходной шероховатости детали, её физико-механических свойств, параметров жёсткости детали и узлов её закрепления изменяются значения предварительной настройки системы выглаживания. Настройка предварительного смещения алмазного наконечника на основе определения смещения частот основных осцилляторов и общего уровня эмиссионного сигнала позволяет учесть все эти априорно незаданные изменения.

Библиографический список

1. Шнейдер, Ю. Г. Технология финишной обработки давлением / Ю. Г. Шнейдер. — Санкт-Петербург : Политехника, 1998. — 414 с.

2. Торбило, В. М. Алмазное выглаживание / В. М. Торбило. — Москва : Машиностроение, 1972. — 104 с.

3. Заковоротный, В. Л. Динамика трибосистем. Самоорганизация, эволюция / В. Л. Заковоротный. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2003. — 502 с.

4. Заковоротный, В. Л. Введение в динамику трибосистем / В. Л. Заковоротный, В. П. Блохин, М. И. Алексейчик. — Ростов-на-Дону : ИнфоСервис, 2004. — 680 с.

5. Папшев, Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. — Москва : Машиностроение, 1978. — 152 с.

Материал поступил в редакцию 05.02.13.

References

1. Shneider, Y. G. Texnologiya finishnoj obrabotki davleniem. [Final pressure shaping technique.] Sankt-Peterburg : Politexnika, 1998, 414 p. (in Russian).

2. Torbilo, V. M. Almaznoe vy`glazhivanie. [Diamond burnishing.] Moscow : Mashinostroeniye, 1972, 104 p. (in Russian).

3. Zakovorotniy, V. L. Dinamika tribosistem. Samoorganizaciya, e`volyuciya. [Tribosystem dynamics. Self-organization, evolution.] Rostov-on-Don, DSTU Publ. Centre, 2003, 502 p. (in Russian).

4. Zakovorotniy, V. L., Blokhin, V. P., Alekseychik, M. I. Vvedenie v dinamiku tribosistem. [Introduction in tribosystem dynamics.] Rostov-on-Don : InfoServis, 2004, 680 p. (in Russian).

5. Papshev, D. D. Otdelochno-uprochnyayushhaya obrabotka plasticheskim deformirovaniyem. [Final yielding strengthening treatment.] Moscow : Mashinostroenie, 1978, 152 p. (in Russian).

VIBROACOUSTIC DIAGNOSIS OF DIAMOND BURNISHING PROCESS[1]

V. L. Zakovorotniy, M. M. Khanukayev
(Don State Technical University)

The problem on the dynamic configuration of the diamond smoothing through the vibroacoustic emission signal control accompanying processing is considered. The dynamic equations based on the analysis which shows that the changes of the gradient mechanical-and-physical properties on the workpiece surface lead to the changes in the spectral composition of the vibroacoustic emission signal are proposed. On this basis, a method of the tuning processing system for the dynamic parameter is offered. It permits to select rational values of diamond tip clamping force to the workpiece. Theoretically, on the basis of the analysis of the smoothing dynamic process frequency characteristics, it is shown that on converging of the tool tip and the workpiece, the gradient of the process mechanical-and-physical properties changes. As a result of the variational equation analysis, changing in the oscillation spectrum is observed. Theoretical ideas are supported by the experimental studies of the process vibration characteristics.

Keywords: *diamond burnishing process, vibroacoustic diagnosis, quality.*

[1] The research is done on 2.17.13 theme within the frame of the government task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in R&D.