

Устойчивость процесса алмазного выглаживания***В. Л. Заковоротный, М. М. Ханукаев**

Рассматривается проблема устойчивости траекторий формообразующих движений при алмазном выглаживании. Предлагаются уравнения динамики, на основе анализа которых определены механизмы и условия потери устойчивости. При анализе устойчивости рассматривается уравнение в вариациях относительно точки равновесия, задаваемой технологическими режимами и внешней постоянной силой, определяющей внедрение наконечника в заготовку. На основе этого предлагается способ настройки технологической системы по динамическим параметрам. Он позволяет выбрать рациональные значения усилия прижима алмазного наконечника к обрабатываемой детали, его геометрию, параметры инструмента и технологические режимы. Показано, что по мере сближения наконечника инструмента с заготовкой система становится более склонной к потере устойчивости. Потеря устойчивости зависит также от радиуса алмазного наконечника и технологических режимов.

Ключевые слова: процесс алмазного выглаживания, устойчивость процесса.

Введение. Методы обработки деталей поверхностным пластическим деформированием достаточно распространены. Они позволяют управлять шероховатостью поверхности, остаточными напряжениями, микротвёрдостью, а также их распределением в приповерхностном слое и др. В результате изменяется износостойкость деталей, контактная выносливость, коррозионная стойкость [1–5]. Выглаживание, как один из методов отделочно-упрочняющей обработки, осуществляется специальным инструментом-выглаживателем, который скользит под определённым давлением по обрабатываемой поверхности, пластически деформируя её, сглаживая при этом микронеровности (следы от предыдущей обработки) и уплотняя поверхностный слой. Поверхности, обработанные алмазным выглаживанием, обладают высокой износостойкостью при образовании пар трения и высокой усталостной прочностью. Однако все эти факторы имеют место в том случае, когда траектории движения инструмента относительно заготовки являются устойчивыми. В противном случае рассматриваемый процесс, как правило, сопровождается автоколебаниями, параметры которых ухудшают качество формируемой поверхности. В статье ставится задача определить факторы, влияющие на устойчивость процесса выглаживания. При этом рассматривается устойчивость траекторий движения вершины наконечника алмазного выглаживателя относительно образца.

Математическое моделирование динамики процесса. Схема процесса приведена на рис. 1. Технологический процесс формируется в результате взаимодействия подсистем инструмента и обрабатываемой детали через динамическую связь, которая образуется в области контакта алмазного наконечника и детали. Эта схема соответствует процессу трения индентора с образцом, который достаточно подробно рассмотрен в работах [6–11]. Конструктивные особенности инструмента таковы, что между наконечником и корпусом устанавливаются пространственные упругие элементы. Поэтому при изучении динамики деформациями заготовки можно пренебречь. Если заданы внешние силы $F(t) = \{F_1(t), F_2(t)\}^T$, то уравнение упругих деформаций можно представить в виде

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

* Работа выполнена по теме № 7.5477.2011 в рамках выполнения госзадания Минобрнауки России в части НИР.

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 упру-

гих коэффициентов, которые являются симметричными и положительно определёнными.

Предварительные исследования также показали, что на основе оператора поворота координат имеется возможность в системе выделить углы ориентации коллинеарных направлений, причем для матрицы упругости и скоростных коэффициентов они совпадают. Угол ориентации коллинеарных осей с учетом высказанных выше особенностей равен (рис. 1, а)

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

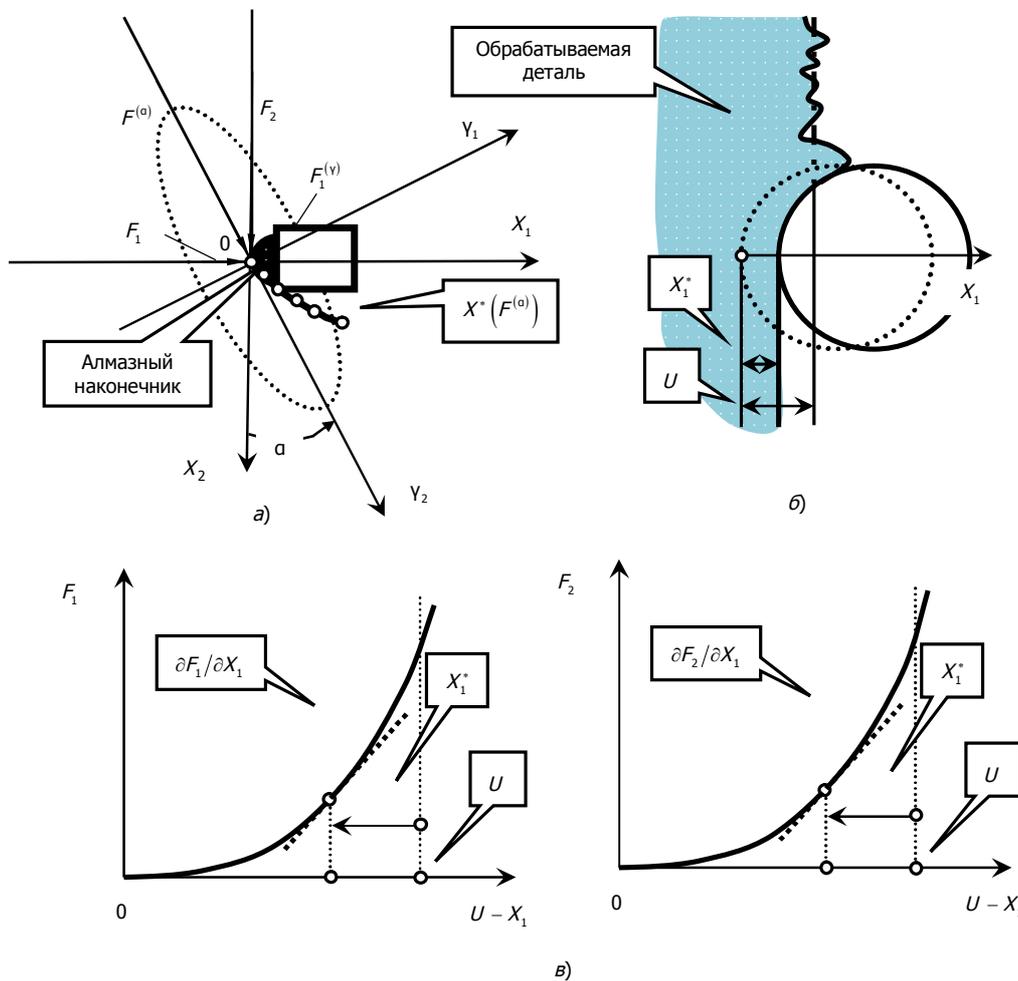


Рис. 1. Система динамической модели: а — координаты, в которых отсчитывается упругое деформационное смещение вершины инструмента и внешние силы; б — схема формирования поверхности выглаживания; в — F_1 и F_2 , функции сближения алмазного наконечника с обрабатываемой поверхностью

Таким образом, если оси $X = \{X_1, X_2\}^T$ и $Y = \{Y_1, Y_2\}^T$ совпадают ($\alpha = 0$), то матрицы c и h также становятся диагональными, а система (1) распадается на два скалярных уравнения. 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, б и в) [7, 8]; 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 [12–14]. Поэтому величины запаздывания по отношению к силам F_1 и F_2 различны.

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

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

где T_1, T_2 — аргументы, моделирующие запаздывания сил в виде аperiодических 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: $\frac{d^2 X_1}{dt^2} = \frac{dX_1}{dt} = \frac{d^2 X_2}{dt^2} = \frac{dX_2}{dt} = \frac{dY_1}{dt} = \frac{dY_2}{dt} = 0, U = \text{const}, f_1(t) = f_2(t) = 0$.

Тогда координаты точки равновесия определяются из системы

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

где X_1^*, X_2^* — координаты точки равновесия. Для анализа устойчивости необходимо рассматривать возмущенное линеаризованное уравнение в вариациях относительно точки равновесия X_1^*, X_2^*

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + h_{\Sigma} \frac{dx}{dt} + c_{\Sigma} x = 0, \quad (5)$$

где $c_{\Sigma} = \begin{bmatrix} c_{1,1} + \frac{\partial \Phi_1}{\partial X_1} & c_{2,1} \\ c_{1,2} + \frac{\partial \Phi_2}{\partial X_1} & c_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{1,1,\Sigma} & c_{2,1} \\ c_{1,2,\Sigma} & c_{2,2} \end{bmatrix}, h_{\Sigma} = \begin{bmatrix} h_{1,1} - T_1 \frac{\partial \Phi_1}{\partial X_1} & h_{2,1} \\ h_{1,2} - T_2 \frac{\partial \Phi_2}{\partial X_1} & h_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1,\Sigma} & h_{2,1} \\ h_{1,2,\Sigma} & h_{2,2} \end{bmatrix}$ — суммарная

матрица жёсткости, учитывающая реакцию со стороны процесса выглаживания и суммарная матрица скоростных коэффициентов; $x = \{x_1(t), x_2(t)\}^T$ — вектор вариаций упругих деформационных смещений относительно точки равновесия X_1^*, X_2^* ; $(X(t) = X^* + x(t))$,

$\Phi_1\left(x_1, T_1 \frac{dx_1}{dt}\right), \Phi_2\left(x_1, T_2 \frac{dx_1}{dt}\right)$ — нелинейные функции, рассматриваемые в вариациях относительно точки равновесия. Они обладают свойствами: $\frac{\partial \Phi_1}{\partial x_1} < 0, \frac{\partial \Phi_2}{\partial x_1} < 0, \Phi_1(0, 0) \equiv 0, \Phi_2(0, 0) \equiv 0$. В матрицах h_{Σ} и c_{Σ} приняты во внимание знаки при производных $\frac{\partial \Phi_1}{\partial x_1}$ и $\frac{\partial \Phi_2}{\partial x_1}$.

Для конкретизации системы (3) были выполнены исследования, направленные на параметрическую идентификацию и изучение свойств функций сближения $F_1(U - X_1)$ и $F_2(U - X_1)$. Во всех случаях при изучении функций сближения рассматривались алмазные инструменты, наконечники которых имели сферическую форму. При этом принято во внимание, что $(U - X_1) = t_p$. Здесь t_p — текущее значение глубины обработки с учётом упругих деформационных смещений. Не останавливаясь на деталях, отметим, что во всех случаях функции сближения можно аппроксимировать параболой, т. е.

$$\begin{cases} F_1 = \begin{cases} a_1 (t_p)^2 & \text{при: } t_p > 0, \\ 0 & \text{при: } t_p < 0; \end{cases} \\ F_2 = \begin{cases} a_2 (t_p)^2 & \text{при: } t_p > 0, \\ 0 & \text{при: } t_p < 0. \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

где a_1, a_2 — параметры, имеющие смысл давления обрабатываемого материала на единицу площади контакта в $[\text{кг}/\text{мм}^2]$. Тогда $\frac{\partial \Phi_1}{\partial x_1}$ и $\frac{\partial \Phi_2}{\partial x_1}$ в (5) для точки равновесия X_1^* соответственно равны

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x_1} = 2a_1 (U - X_1^*); \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial x_1} = 2a_2 (U - X_1^*). \end{cases} \quad (7)$$

Смещение инструмента по направлению X_2^* не вызывает вариаций сил, так как в этом случае нет изменений площади контакта инструмента и обрабатываемой части заготовки. Случай отрыва инструмента от поверхности обрабатываемой детали не рассматривается.

Установлено, что существует два механизма потери устойчивости траектории. Первый обусловлен формированием циркуляционных сил контактного взаимодействия, возникающих в результате того, что суммарная матрица упругости является несимметричной. Второй обусловлен преобразованием симметричной составляющей матрицы скоростных коэффициентов из положительно определённой в отрицательно определённую. Это происходит за счёт запаздывающих аргументов в уравнении (5). При этом принимается во внимание известное из механики положение, что кососимметричные составляющие матриц скоростных коэффициентов, формирующие гироскопические силы, не могут стабилизировать равновесие системы, если оно неустойчиво. Во всех случаях увеличение предварительного натяга положения вершины инструмента относительно поверхности заготовки вызывает возрастание циркуляционных сил и способствует преобразованию положительно определённой матрицы скоростных коэффициентов из положительно определённой в отрицательно определённую. Для анализа же устойчивости системы необходимо рассмотреть следующее характеристическое уравнение

$$\Delta(p) = \begin{bmatrix} mp^2 + [h_{1,1} - 2T_1 a_1 (U - X_1^*)]p + [c_{1,1} + 2a_1 (U - X_1^*)] & h_{2,1}p + c_{1,2} \\ [h_{1,2} - 2T_2 a_2 (U - X_1^*)]p + [c_{1,2} + 2a_2 (U - X_1^*)] & mp^2 + h_{2,2}p + c_{2,2} \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

Оно позволяет проанализировать влияние параметров динамической связи и подсистемы инструмента на устойчивость. В частности, если в (2) $\alpha = 0$, то условие устойчивости, определяется требованием: $h_{1,1} > 2T_1 a_1 (U - X_1^*)$. В этом случае, при прочих неизменных условиях, существует предельное значение глубины внедрения, при котором система теряет устойчивость. Она увеличивает запас устойчивости и при возрастании скорости резания, влияющей на величину запаздывающего аргумента T_1 .

Пример анализа устойчивости и формирования стационарных многообразий в окрестности равновесия. В качестве примера на рис. 2 показана область устойчивости в параметрическом пространстве. Для наглядности при вычислении областей устойчивости в динамической модели принято: $T_2 = 1,5T_1$.

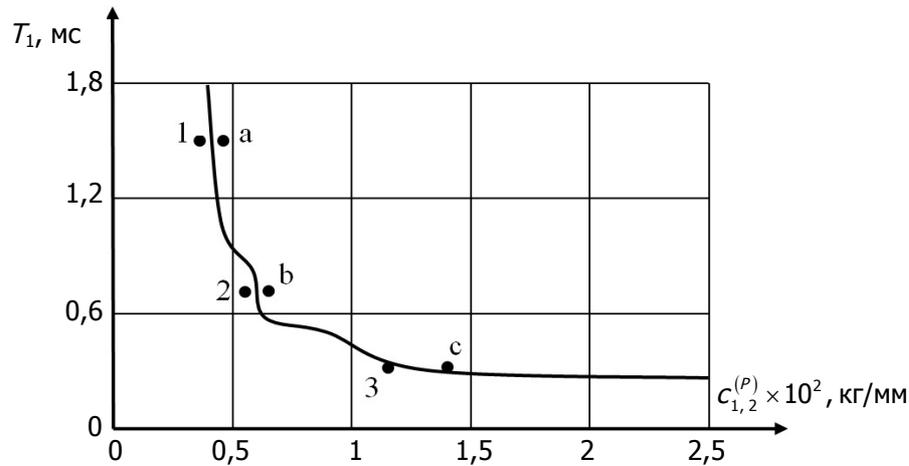


Рис. 2. Область устойчивости системы в параметрическом пространстве

Параметры динамической подсистемы инструмента: $[m] = \begin{bmatrix} 3,2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{мм}} & 0 \\ 0 & 3,2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{мм}} \end{bmatrix};$

$$[h] = \begin{bmatrix} 0,09 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{мм}} & 0,02 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{мм}} \\ 0,02 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{мм}} & 0,1 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{мм}} \end{bmatrix}; [c] = \begin{bmatrix} 202 \frac{\text{кг}}{\text{мм}} & -150 \frac{\text{кг}}{\text{мм}} \\ -150 \frac{\text{кг}}{\text{мм}} & 801 \frac{\text{кг}}{\text{мм}} \end{bmatrix}.$$

Рассматриваемая система имеет две основных резонансных частоты: $\omega_{0,1} = 0,8$ кГц и $\omega_{0,2} = 1,5$ кГц. Кроме этого, на рис. 2 обозначено $c_{1,1}^{(P)} = 2a_1 [U - X_1^*]$ — жёсткость процесса резания в направлении X_1 . Жёсткость процесса резания в направлении X_2 принята $c_{1,2}^{(P)} = 0,5c_{1,1}^{(P)}$. На иллюстрации точки 1, 2, 3 находятся в области устойчивости, а точки a, b, c — в области неустойчивости. Как видно, существуют некоторые критические значения жёсткости процесса резания и величин запаздывающих аргументов, при которых система является абсолютно устойчивой. Эти значения на рисунке приведены в виде точечных прямых. В том же случае, если параметры соответствуют неустойчивым точкам равновесия, то в их окрестности формируются устойчивые многообразия, для анализа которых необходимо рассматривать исходную систему (3) с учётом нелинейных связей.

Выполненное цифровое моделирование системы (3) с учётом нелинейности динамической характеристики процесса показали, что наиболее типичным при алмазном выглаживании является формирование орбитально-асимптотически устойчивых предельных циклов (рис. 3). В этом случае при переходе от точки 2 к точке *b* на рис. 2 наблюдается бифуркация Андронова-Хопфа. Однако в некоторых случаях формируются и двумерные инвариантные торы. При этом асимптотически устойчивая точка равновесия (точка 1 на рис. 2) преобразуется в двумерный инвариантный тор (точка *a*). На приведённых иллюстрациях (рис. 3) показаны: траектории в плоскости « $X_1 - X_2$ » (верхние левые иллюстрации); проекции фазовых траекторий на плоскость « $X_1 - dX_1/dt$ » (верхние правые иллюстрации); проекции фазовых траекторий на плоскость « $X_2 - dX_2/dt$ » (нижние левые иллюстрации); временные траектории (нижние правые траектории). Формируемые многообразия в динамической системе оставляют регулярные следы на поверхности заготовки. Пример их фотографии приведен на рис. 4.

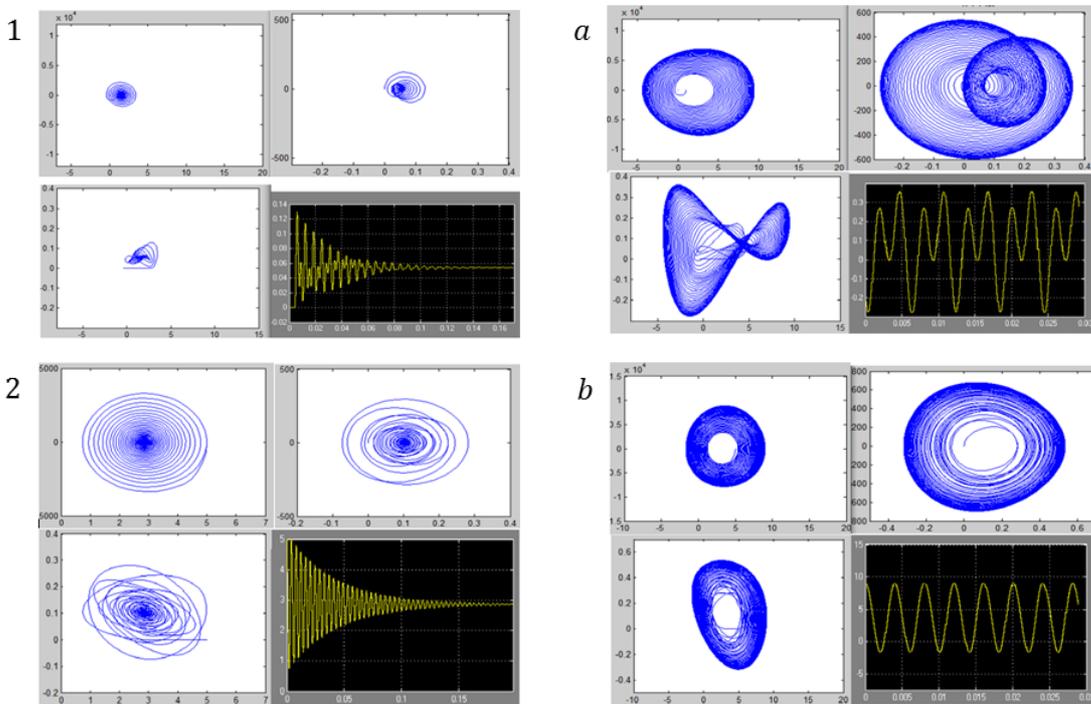


Рис. 3. Стационарные многообразия: 1, 2 — асимптотически устойчивые точки равновесия; *a* — двумерный тор; *b* — предельный цикл (одночастотные автоколебания)

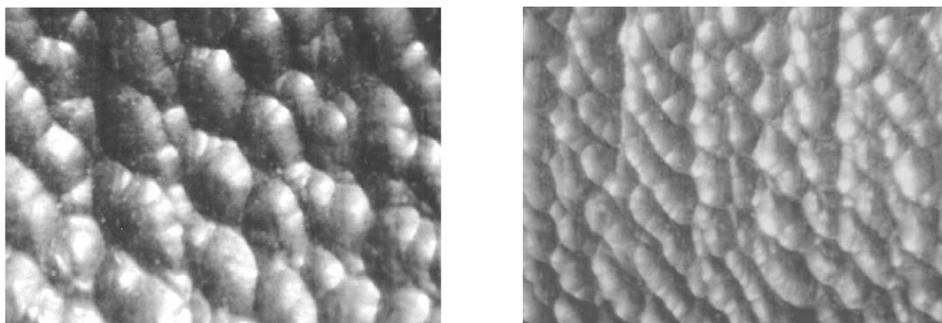


Рис. 4. Пример макрорельефа формируемой поверхности в процессе выглаживания в случае, когда инструмент теряет устойчивость точки равновесия и в системе формируются устойчивые автоколебания

Заключение.

1. По своей природе динамическая система процесса выглаживания является аналогичной системе трения интентора относительно образца. Однако рассматриваемый процесс осуществляется в условиях больших контактных нагрузок и значительных пластических деформаций поверхностного слоя обрабатываемой заготовки. Поэтому потеря устойчивости траекторий движения инструмента относительно заготовки является типичной, но недопустимой исходя из цели повышения качества обрабатываемой поверхности.

2. Условия устойчивости принципиально зависят от параметров подсистемы инструмента. Здесь главное значение имеет матрица жёсткости. Поэтому первое направление обеспечения устойчивости процесса связано с установлением рациональных упругих элементов между наконечником и корпусом инструмента. Кроме этого, большое значение имеет ориентация эллипсов жёсткости подсистемы инструмента в плоскости, нормальной к оси вращения заготовки. Ориентация эллипса жёсткости определяется конструктивными свойствами упругих элементов, установленными между алмазным наконечником и корпусом инструмента.

3. На устойчивость принципиально влияет внешнее усилие, зависящее от координаты X_0 . Во всех случаях, при увеличении этого усилия, система становится более склонной к потере устойчивости. На потерю устойчивости также оказывают влияние запаздывающие аргументы, которые уменьшаются по мере увеличения скорости обработки.

4. Обнаружено, что на устойчивость процесса оказывает влияние радиус сферы алмазного наконечника. Если радиус сферы больше расстояния от поверхности инструмента до центра его вращения, то в системе формируется положительная обратная связь, существенно ухудшающая условия устойчивости системы. Поэтому существует компромисс между желанием увеличить радиус, исходя из требований повышения качества поверхности, и повышением склонности системы к потере устойчивости. В условиях наших исследований рациональный радиус сферы алмазного наконечника равен 4,5 мм.

5. Приведённые математические модели и методика анализа позволяют на стадии проектирования определять технологические параметры и усилие прижима инструмента к заготовке, при которых процесс алмазного выглаживания имеет асимптотически устойчивые проектируемые траектории формообразующих движений.

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. Динамическая диагностика процесса обработки методами поверхностного пластического деформирования / В. Л. Заковоротный, В. С. Минаков, М. М. Ханукаев // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 1 (62), вып. 2. — С. 38–45.
4. Zakovorotny, V. L., Bordatchev, E. V., Subramaniam, K. S. Dynamic diagnostic of tribological contacts. *Zagadnienia eksploatacji maszyn*, 1994, vol. 29, pp. 3–8.
5. Папшев, Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. — Москва : Машиностроение, 1978. — 152 с.
6. Заковоротный, В. Л. Динамика трибосистем. Самоорганизация, эволюция / В. Л. Заковоротный. — Ростов-на-Дону : Изд-во Дон. гос. техн. ун-та, 2003. — 502 с.
7. Заковоротный, В. Л. Введение в динамику трибосистем / В. Л. Заковоротный, В. П. Блохин, М. И. Алексейчик. — Ростов-на-Дону : ИнфоСервис, 2004. — 680 с.

8. Шаповалов, В. В. Амплитудно-фазочастотный анализ критических состояний фрикционных систем / В. В. Шаповалов [и др.]. — Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2010. — 383 с.

9. Zakovorotny, V. L., Samosudov, A. A. The problems of managing the evolution of the dynamic system, interacting with the environment. Engineering and automation problems, 2006, special iss., pp. 78–90.

10. Заковоротный, В. Л. Влияние структуры сил на устойчивость движения механической системы, взаимодействующей с трением / В. Л. Заковоротный, В. Е. Ступин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия : Технические науки. — 2007. — № 1. — С. 83–90.

11. Заковоротный, В. Л. Устойчивость эволюционной траектории механической системы, взаимодействующей с трибосредой / В. Л. Заковоротный, Нгуен Донг Ань, Фам Динь Тунг // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2007. — Т. 7, № 4 (35). — С. 425–440.

12. Заковоротный, В. Л. Условия потери устойчивости движения механической системы, взаимодействующей с трибосредой / В. Л. Заковоротный, А. Д. Лукьянов, В. Е. Ступин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2007. — Т. 7, № 3 (34). — С. 283–291.

13. Zakovorotny, V. L., Marchak, M., Usikov, I. V., Lukyanov, A. D. Interrelation between tribosystem evolution and parameters of dynamic friction system Journal of Friction and Wear, 1998, vol. 19, pp. 54–64.

14. Заковоротный, В. Л. Влияние асимметрии динамических характеристик системы, взаимодействующей со средой, на устойчивость стационарных траекторий / В. Л. Заковоротный // Известия Южного федерального университета. Технические науки. — 2006. — Т. 61, № 6. — С. 111–120.

Материал поступил в редакцию 26.08.2013.

References

1. Schneider, Y. G. Tekhnologiya finishnoy obrabotki davleniyem. [Finish shaping technology.] Saint Petersburg : Politekhnik, 1998, 414 p. (in Russian).

2. Torbilo, V. M. Almaznoye vyglazhivaniye. [Diamond burnishing.] Moscow : Mashinostroyeniye, 1972. — 104 p. (in Russian).

3. Zakovorotny, V. L., Minakov, V. S., Khanukayev, M. M. Dinamicheskaya diagnostika protsessa obrabotki metodami poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya. [Dynamic diagnostics of surface yielding treatment techniques.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 1 (62), iss. 2, pp. 38–45 (in Russian).

4. Zakovorotny, V. L., Bordatchev, E. V., Subramaniam, K. S. Dynamic diagnostic of tribological contacts. Zagadnienia eksploatacji maszyn, 1994, vol. 29, pp. 3–8.

5. Papshev, D. D. Otdelochno-uprochnyayushchaya obrabotka plasticheskimi deformirovaniyem. [Finish strengthening yielding treatment.] Moscow : Mashinostroyeniye, 1978, 152 p. (in Russian).

6. Zakovorotny, V. L. Dinamika tribosistem. Samoorganizatsiya, evolyutsiya. [Tribosystem dynamics. Self-organization, evolution.] Rostov-on-Don : DSTU Publ., 2003, 502 p. (in Russian).

7. Zakovorotny, V. L., Blokhin, V. P., Alexeychik, M. I. Vvedeniye v dinamiku tribosistem. [Introduction to tribosystem dynamics.] Rostov-on-Don : InfoServis, 2004, 680 p. (in Russian).

8. Shapovalov, V. V., Chelokhyan, A. V., Kolesnikov, I. V., Ozyabkin, A. L., Kharlamov, P. V. Amplitudo-fazochastotnyy analiz kriticheskikh sostoyaniy friktsionnykh sistem. [Amplitude-phase frequency analysis of friction system critical state.] Moscow : Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2010, 383 p. (in Russian).

9. Zakovorotny, V. L., Samosudov, A. A. The problems of managing the evolution of the dynamic system, interacting with the environment. Engineering and automation problems, 2006, special iss., pp. 78–90.

10. Zakovorotny, V. L., Stupin, V. E. Vliyaniye struktury sil na ustoychivost dvizheniya mekhanicheskoy sistemy, vzaimodeystvuyushchey s treniyem. [Force structure effect on dynamical stability of mechanical system interacting with friction.] Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya : Tekhnicheskiye nauki, 2007, no. 1, pp. 83–90 (in Russian).

11. Zakovorotny, V. L., Nguyen Dong Anh, Pham Dinh Tung Ustoychivost evolyutsionnoy trayektorii mekhanicheskoy sistemy, vzaimodeystvuyushchey s tribosredoy. [Evolution trajectory stability of mechanical system interacting with tribomedia.] Vestnik of DSTU, 2007, vol. 7, no. 4 (35), pp. 425–440 (in Russian).

12. Zakovorotny, V. L., Lukyanov, A. D., Stupin, V. E. Usloviya poteri ustoychivosti dvizheniya mekhanicheskoy sistemy, vzaimodeystvuyushchey s tribosredoy. [Conditions of dynamic instability of mechanical system interacting with tribomedium.] Vestnik of DSTU, 2007, vol. 7, no. 3 (34), pp. 283–291 (in Russian).

13. Zakovorotny, V. L., Marchak, M., Usikov, I. V., Lukyanov, A. D. Interrelation between tribosystem evolution and parameters of dynamic friction system. Journal of Friction and Wear, 1998, vol. 19, pp. 54–64.

14. Zakovorotny, V. L. Vliyaniye asimmetrii dinamicheskikh kharakteristik sistemy, vzaimodeystvuyushchey so sredoy, na ustoychivost statsionarnykh trayektoriy. [Effect of dynamic characteristic nonsymmetry of the system interacting with medium on stationary trajectory stability.] Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki, 2006, vol. 61, no. 6, pp. 111–120 (in Russian).

DIAMOND BURNISHING PROCESS STABILITY*

V. L. Zakovorotny, M. M. Khanukayev

The problem on the shape forming trajectory motions stability under the diamond burnishing is considered. The dynamical equations on which analysis basis mechanisms and conditions of buckling failure are determined, are offered. To analyze the stability, the equation in variations about the balance point specified by the technological modes and an external constant force determining the indentation of the diamond point into the workpiece is considered. On this basis, a technique of the engineering system setting according to the dynamic parameters is offered. Based on that, we offer a method of setting up the machine based on dynamic parameters. It allows selecting rational values of the holddown pressure of the diamond point to the surface of the processed part, its geometry, tool settings and machine modes. It is shown that with the approach of the tool point to the workpiece, the system tends to lose stability. The buckling failure also depends on the radius of the diamond point and machine settings.

Keywords: diamond burnishing process, stability.

* The research is done on 7.5477.2011 theme within the frame of the government task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in R&D.