

УДК 621.9

М. Н. Нагоркин, А. В. Тотай, В. П. Фёдоров

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ УПРУГОГО ДЕЙСТВИЯ НА ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Рассмотрено влияние динамических характеристик инструментов упругого действия на технологическую устойчивость процессов ППД при алмазном выглаживании плоских и цилиндрических поверхностей деталей машин.

Ключевые слова: динамическая модель, частота колебаний, передаточная функция, амплитудно-частотная характеристика, фазочастотная характеристика, технологическая гибкость, критическая скорость обработки, ППД.

Процессы формирования параметров качества поверхностного слоя (ПКПС) деталей машин методами поверхностного пластического деформирования (ППД) инструментами упругого действия отличаются высокой технологической гибкостью [2; 3].

Технологическая система (ТС) ППД представляет собой сложную динамическую систему, в которой важным фактором, оказывающим влияние на формирование ПКПС деталей, являются статические и динамические характеристики инструмента упругого действия. Модель инструмента включает подвижную массу m , пружину с жёсткостью c для создания номинальной силы обработки и демпфирующие элементы (смазка, сила трения и др.).

Одним из основных факторов, определяющих качество обработки при ППД, является давление на пятне контакта обрабатываемой поверхности и деформирующего элемента (шарик, ролик, алмазный выглаживатель), определяемое геометрическими параметрами контакта и силой, приложенной к индентору.

Обрабатываемая поверхность может иметь функционально заданные отклонения от правильной геометрической формы (рабочая поверхность копиров, кулачков). Также поверхности характеризуются геометрическими параметрами качества после предшествующей ППД обработки: макроотклонениями, отклонениями от круглости, волнистостью, шероховатостью. Указанные параметры при обработке со скоростью V оказывают непрерывное входное воздействие на индентор устройства ППД, вызывая выходную реакцию его подвижных элементов в виде колебаний по оси возможного перемещения. Результатом этого является изменение давления в зоне контакта поверхности с индентором и, как следствие, непостоянство формируемых геометрических и физико-механических параметров качества. Этот эффект наиболее ощутим при методах ППД, чувствительных к вариации давления, например при алмазном выглаживании, где силы выглаживания невелики, а скорости обработки высокие.

Устойчивость процесса обработки ППД может характеризоваться одним главным критерием – обеспечением параметров качества обрабатываемой поверхности в регламентированных пределах. В связи с этим сила воздействия индентора на обрабатываемую поверхность не должна выходить за допустимые пределы относительно номинального значения.

Далее рассматривается влияние на технологическую устойчивость процессов ППД динамических характеристик устройств упругого действия, представляющих собой колебательную систему с одной степенью свободы, на примерах алмазного выглаживания плоских и цилиндрических поверхностей деталей машин.

Технологическая оснастка для алмазного выглаживания (АВ) плоских поверхностей деталей инструментом упругого действия представляет собой многомассовую замкнутую систему с упругими связями между элементами. В её модели (рис. 1 а) ξ – колебания, воздействующие на ТС АВ через корпус выглаживателя упругого действия со стороны мно-

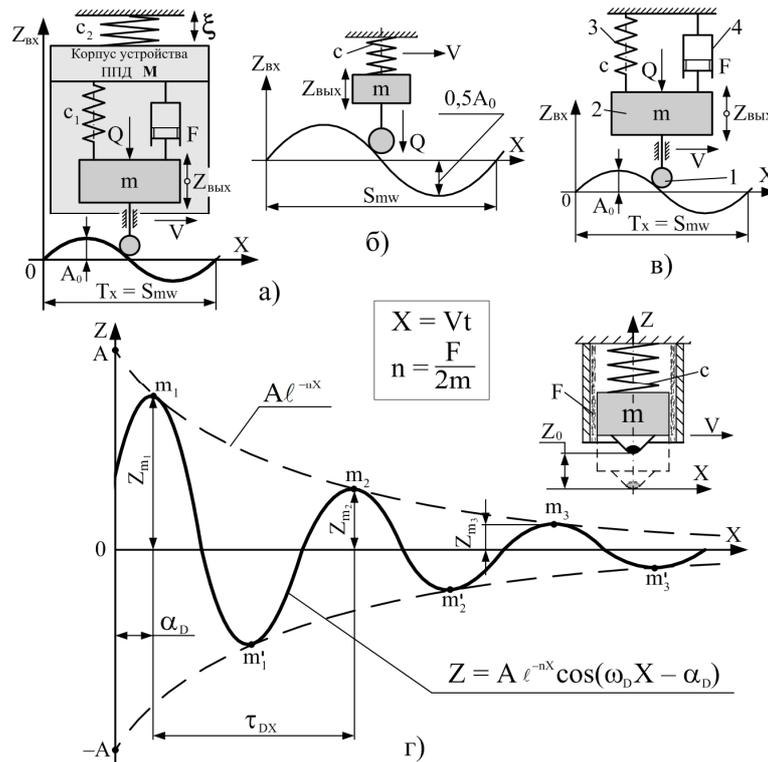


Рис. 1. Динамические модели ТС ППД с устройствами упругого действия и вертикальной осью перемещения индентора: а - общая динамическая модель ТС; б - простейшая динамическая модель устройства ППД; в - динамическая модель устройства ППД с демпфированием; г - динамика вертикальных колебаний индентора в зависимости от длины обработки X

жесткость упругого элемента устройства ППД значительно меньше жесткости многомассовой системы технологического оборудования ($c_1 \ll c_2$), можно с определенной погрешностью принять допущение, что $\xi = 0$. Тогда простейшая динамическая модель устройства упругого действия для алмазного выравнивания без учета демпфирования (рис. 1 б) представит собой одномассовую подпружиненную систему, включающую подвижные элементы массой m , прижимаемые к обрабатываемой поверхности пружиной жесткостью c . Индентор контактирует с обрабатываемой поверхностью, сечение которой в направлении обработки X представляет собой синусоиду с амплитудой $A_0 = 0,5Wmax$ и шагом S_{mw} (параметры волнистости, полученной после предшествующей выравниванию обработки). Индентор прижимается к поверхности с силой Q .

Уравнение волнистости обрабатываемой поверхности в предположении её регулярности принимаем в виде синусоиды:

$$Z_{ex} = A_0 \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Здесь A_0 – амплитуда; ω – круговая частота; φ_0 – начальный фазовый угол.

Скорость обработки V определяет пространственную координату X ($X = Vt$) и круговую частоту $\left(\omega = \frac{2\pi}{S_{mw}}V\right)$. Принимая $\varphi_0 = 0$, получим

$$Z_{ex} = \frac{Wmax}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{S_{mw}}X\right). \quad (1)$$

Простейшая динамическая модель устройства ППД упругого действия (рис. 1б) представляет собой одномассовую колебательную систему без демпфирования. Такую упрощенную модель можно принимать при АВ с небольшой величиной силы Q , низкой скоростью V и минимальными значениями $Wmax$.

гомассовой станочной системы; c_1 – жесткость упругого элемента выравнивателя; c_2 – жесткость упругой системы «оборудование – корпус выравнивателя».

Процесс формирования параметров качества выравниваемой поверхности сопровождается колебательными движениями выравнивателя вдоль оси Z , определяемыми частотными характеристиками. Движение линейных упругих систем, состоящих из n масс, можно описать уравнением в соответствии с принципом Даламбера:

$$m_k \ddot{Z}_k + \sum \delta_{ki} Z_i = Q_k(t),$$

где m_k – масса выбранной k -й точки системы; δ_{ki} – коэффициенты влияния; Z_i – перемещение i -й точки; $Q_k(t)$ – сила, приложенная в k -й точке системы.

Учитывая, что жест-

Модель более высокого уровня (рис. 1 в) включает элемент демпфирования F , учитывающий влияние трения между контактирующими поверхностями устройства ППД при наличии смазки.

В случае обработки более сложных профилей входной величиной моделей будет периодический сигнал, представляющий собой сумму синусоидальных составляющих, получаемых при разложении реального исходного профиля (рис. 1 г) в ряд Фурье:

$$Z_{ex}(X) = \frac{Wmax_0}{4} + \sum_{k=1}^n \frac{Wmax_k}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{Smw_k} X + \varphi_k\right),$$

где $Wmax_0$ – максимальная высота волны для основной гармоники; $Wmax_k$ – максимальная высота волны для k -й гармоники; Smw_k – шаг волны по средней линии для k -й гармоники; φ_k – фаза k -й гармоники.

Для успешного решения задачи прогнозирования обработки волнистых и фасонных поверхностей и назначения соответствующих режимов [4] в частотной области необходимо провести исследование динамических характеристик устройств ППД упругого действия как звена ТС и собственно процесса обработки на основе принятой модели.

В рассматриваемом случае входной величиной $Z_{ex}(X)$ является волнистость или иной закон отклонений поверхности, а выходной $Z_{вых}(X)$ – колебания индентора (алмазного выглаживателя, шарика и т. п.) совместно с подвижной частью устройства ППД вдоль оси Z . Такой подход даёт возможность на основе теории автоматического управления (ТАУ) установить влияние параметров волнистости поверхности, полученной после предварительной обработки, и динамики работы устройства ППД на колебания индентора $Z_{вых}(X)$ в зависимости от скорости обработки. Для решения этой задачи примем допущение равенства частот ω для входной и выходной величин и будем использовать математический аппарат теории колебаний и теории линейных систем автоматического регулирования.

Дифференциальное уравнение свободных колебаний устройств ППД упругого действия с вертикальной осью (рис. 1 в) имеет вид

$$m\ddot{Z} = mg - (mg + cZ) - F\dot{Z}, \quad (2)$$

где Z – величина перемещения индентора; F – коэффициент вязкого трения.

Разделив левую и правую части уравнения (2) на m и введя обозначения

$$\omega_0 = c / m; 2n = F / m,$$

где ω_0 – собственная частота колебаний подвижной части устройства ППД, получим уравнение свободных колебаний с вязким демпфированием:

$$\ddot{Z} + 2n\dot{Z} + \omega_0^2 Z = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой уравнение свободных колебаний подвижной части устройства ППД как элемента ТС. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний можно получить из уравнения (3) путём учёта в его правой части возмущающего воздействия $f(X)$ – волнистости поверхности $W(X)$, закона изменения профиля $L(X)$ и т. д. В рассматриваемом случае обработки волнистой поверхности дифференциальное уравнение с учётом вязкого демпфирования (модель на рис. 1 в) имеет вид

$$\ddot{Z} + 2n\dot{Z} + \omega_0^2 Z = k \frac{Wmax}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{Smw} X\right).$$

В правой части уравнения учтена волнистость в соответствии с уравнением (1).

В основе рассматриваемой модели лежит передаточная функция $K(p)$ устройства ППД как динамического элемента, связывающая входную и выходную величины:

$$Z_{вых}(p) = K(p) Z_{ex}(p),$$

где $Z_{ex}(p)$, $Z_{вых}(p)$ – изображения входной и выходной величин соответственно; p – оператор Лапласа.

Передаточная функция устройства ППД упругого действия в соответствии с уравне-

нием (3):

$$K(p) = \frac{k}{p^2 + 2np + \omega_0^2}.$$

Замена символа p на $j\omega$ даёт амплитудно-фазовую характеристику системы $K(j\omega)$.

Входной сигнал $Z_{\text{вх}}(X)$ (волнистость обрабатываемой поверхности) и выходной $Z_{\text{вых}}(X)$ (колебания индентора при ППД) при векторной форме представления имеют следующие значения:

$$\bar{Z}_{\text{вх}}(X) = \frac{W \max}{2} (\cos \omega_X X + j \sin \omega_X X) = \frac{W \max}{2} e^{j\omega_X X};$$

$$\bar{Z}_{\text{вых}}(X) = A e^{j(\omega_X X + \varphi_{\text{вых}})},$$

где $\omega_X = 2\pi / Smw$ – круговая частота волнистости обрабатываемой поверхности; $\varphi_{\text{вых}}$ – фазовый угол между волнистостью и колебаниями индентора; $j = \sqrt{-1}$.

Амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) устройства:

$$K(j\omega) = \frac{\bar{Z}_{\text{вых}}(X)}{\bar{Z}_{\text{вх}}(X)} = \frac{2A}{W \max} e^{j(\varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}})}.$$

Согласно ТАУ, уравнения колебательного звена имеют вид

$$T_1^2 \ddot{Z}_{\text{вых}} + T_2^2 \dot{Z}_{\text{вых}} + Z_{\text{вых}} = kZ_{\text{вх}} \quad \text{или} \quad T^2 \ddot{Z}_{\text{вых}} + 2\chi \dot{Z}_{\text{вых}} + Z_{\text{вых}} = kZ_{\text{вх}},$$

где T_1, T_2 – постоянные времени звена; $T_1 = 1 / \omega_0$; $T_2 = 2\chi / \omega_0$; k – статический коэффициент усиления звена, равный отношению установившихся значений выходной и входной величин; $\chi = T_2 / T_1$ – постоянная затухания звена; ω_0 – собственная частота незатухающих колебаний звена.

Учитывая, что $2\omega_0 \chi = 2n = F / m$; $\omega_0^2 = c / m$, получим характеристическое уравнение

$$\frac{m}{c} \ddot{Z}_{\text{вых}} + \frac{F}{c} \dot{Z}_{\text{вых}} + Z_{\text{вых}} = kW(X),$$

где $W(X) = Z_{\text{вх}}$ – волнистость поверхности в направлении X .

Тогда передаточная функция $K(p)$ устройства ППД упругого действия и амплитудно-фазовая характеристика в комплексной форме $K(j\omega)$ имеют следующий вид:

$$K(p) = \frac{k}{\frac{m}{c} p^2 + \frac{F}{c} p + 1}; \quad K(j\omega) = \frac{k}{-\frac{m}{c} \omega^2 + \frac{F}{c} (j\omega) + 1}.$$

В эти уравнения явно входят факторы c, m, F , определяющие динамические характеристики инструмента, и частота ω , которая определяется состоянием предварительно обработанной поверхности (Smw) и режимами обработки (V):

$$\omega = 2\pi \frac{V}{Smw} = 33,32 \frac{\pi^2 d n}{Smw},$$

где d – диаметр установки индентора; n – частота вращения инструмента.

Практический интерес представляют амплитудно- и фазочастотные характеристики инструмента, которые являются модулем $K(\omega)$ и фазой $\varphi(\omega)$ АФХ соответственно и определяются выражениями (при $k = 1$)

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(33,32 \frac{\pi^2 d N}{Smw}\right)^2 \frac{F}{c}\right)^2 + \left(33,32 \frac{\pi^2 d N}{Smw}\right)^2 \frac{m}{c}}};$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \left(- \frac{33,32 \frac{\pi^2 dN F}{Smw c}}{1 - \left(33,32 \frac{\pi^2 dN}{Smw} \right)^2 \frac{m}{c}} \right).$$

Для универсализации графических изображений АЧХ и ФЧХ вводим в рассмотрение коэффициент демпфирования γ и динамический коэффициент усиления β :

$$\gamma = \frac{F}{F_{кр}} = \frac{F}{2m\omega_0} = \frac{F}{2m\sqrt{\frac{c}{m}}}; \quad \beta = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{2\gamma\omega}{\omega_0^2}\right)^2}}.$$

С учётом этих зависимостей динамические характеристики принятой модели устройства ППД упругого действия имеют вид, представленный на рис. 2.

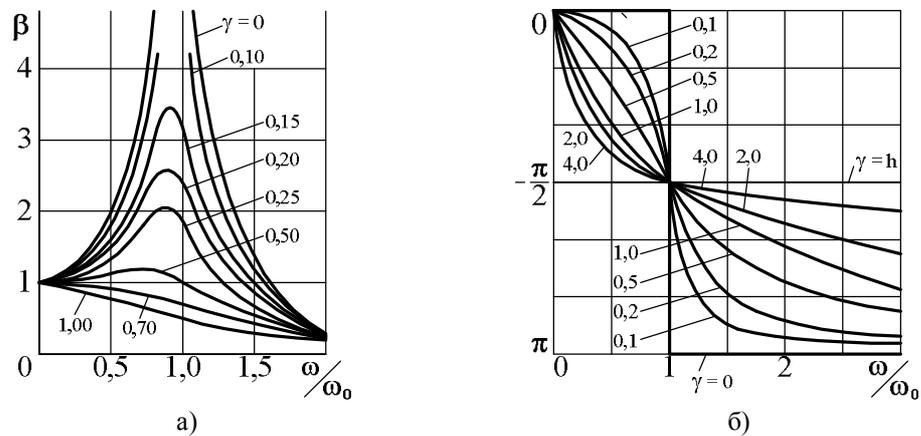


Рис. 2. Частотные характеристики динамической модели устройства ППД упругого действия: а – амплитудно-частотная; б – фазочастотная

Полученные динамические характеристики устройства ППД указывают на возможность следующих схем контактирования индентора 5 с обрабатываемой волнистой поверхностью (рис. 3): 1) обработка без отрыва индентора от обрабатываемой поверхности (траектория 1); 2) обработка с отскоком от профиля волны (траектории 2, 3); 3) обработка с подбрасыванием (траектория 4).

Если $\omega \gg \omega_0$, величина β близка к нулю независимо от степени демпфирования γ .

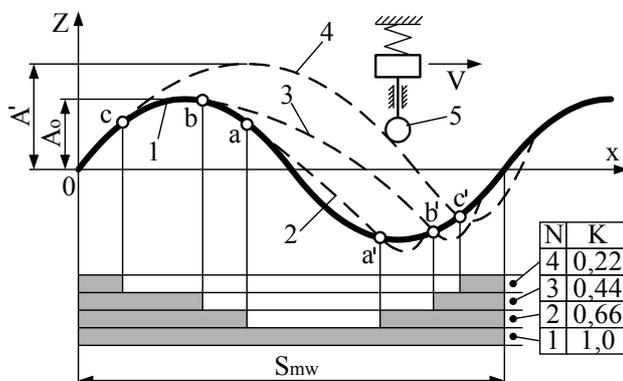


Рис. 3. Возможные траектории движения индентора при алмазном выглаживании плоских волнистых поверхностей: N – траектория движения вершины индентора; K – коэффициент контактирования

Это означает, что высокочастотные составляющие неровностей предварительно обработанной поверхности практически не вызывают вынужденных колебаний индентора в системе ППД с низкими значениями собственной частоты. Когда отношение ω / ω_0 близко к единице, коэффициент усиления резко увеличивается и его величина в околорезонансной зоне становится весьма чувствительной к изменению коэффициента демпфирования.

Анализ ФЧХ показывает, что при $\omega / \omega_0 \ll 1$ фазовый угол φ практически

равен 0, а при $\omega / \omega_0 \gg 1$ он практически равен π . Поэтому влияние демпфирования на фазовый угол можно также всегда не принимать во внимание, за исключением резонансной зоны.

В случаях 2, 3 неизбежен удар при повторном контакте индентора с поверхностью в точках a' , b' , c' , что накладывает определённый отпечаток на формирование параметров качества поверхностного слоя (вмятины и т. п.).

Степень воздействия упрочняющего индентора на поверхность удобно оценивать коэффициентом контактирования K , представляющим собой отношение суммы длин участков профиля волн предварительно обработанной поверхности, контактирующих с индентором, к общей длине обработки. Его величина определяется динамическими характеристиками устройства, скоростью обработки V и параметрами $Wmax$ и Smw , полученными предварительной обработкой.

Коэффициент контактирования индентора с обрабатываемой волнистой поверхностью предлагается определять как отношение суммы проекций линий контакта индентора с поверхностью к базовой длине обработки:

$$K = \sum_{i=1}^m Pr_X L_i / L_0,$$

где $Pr_X L_i$ – проекция на ось X i -го участка волны, контактирующего с индентором; L_0 – базовая длина измерений.

Стабильность процесса АВ определяется безотрывностью движения индентора по обрабатываемой волнистой поверхности, т. е. реализацией траектории 1 (рис. 3). Она достигается в том случае, когда колебания силы обработки Q не превышают установленных норм. Сила выглаживания определяется уравнением

$$Q = m\ddot{Z} + F\dot{Z} + c(Z - Z_0) + mg. \quad (4)$$

Стабильность процесса выглаживания, т. е. безотрывность движения индентора, достигается при условии $Q \geq 0$. Условие постоянства усилия выглаживания $Q = const$ можно выразить в виде

$$mg \gg m\ddot{Z} + F\dot{Z} + cZ \quad \text{или} \quad cZ_0 \gg m\ddot{Z} + F\dot{Z} + cZ.$$

При приближённом представлении волнистости поверхности в виде синусоиды (1) после ряда преобразований выражения (4) получим условие, при котором индентор не отрывается от обрабатываемой волнистой поверхности:

$$\left(\frac{c}{m} - \left(\frac{2\pi \cdot V}{Smw} \right)^2 \right) \left(\frac{2\pi}{Smw} X \right) + \lambda \frac{c}{m} \geq 0,$$

или, в сокращённом виде,

$$\left(\omega_0^2 - \omega^2 \right) \sin \omega t + \lambda \omega_0^2 \geq 0.$$

Здесь $\lambda = Z_0 / Wmax$ – коэффициент, учитывающий, во сколько раз величина предварительного натяжения пружины больше высоты волны предварительно обработанной поверхности.

На основе этого неравенства можно определить критическую частоту, при которой индентор оторвётся от обрабатываемой поверхности:

$$\omega_{кр} \leq \sqrt{\frac{2\lambda c}{m}} = \sqrt{\frac{2Z_0}{Wmax} \frac{Q}{Z_0} \frac{g}{G}} = \sqrt{\frac{2g}{Wmax} \frac{Q}{G}} = \sqrt{\frac{2Q}{Wmax \cdot m}}.$$

Так как $\omega_{кр} = 2\pi V / Smw$, то при известных параметрах волнистости $Wmax$ и Smw обрабатываемой поверхности и заданном усилии выглаживания Q для конкретного устройства ППД допустимая из условия безотрывности индентора скорость обработки V должна удовлетворять неравенству

$$V \leq \frac{Smw}{2\pi} \sqrt{\frac{2Q}{W_{max} \cdot m}}$$

Адекватность теоретических результатов оценивалась физическим моделированием процесса АВ волнистой поверхности (рис. 4) на станке с ЧПУ модели 6P13Ф3 («Контур-2ПТ-71/3») [1].

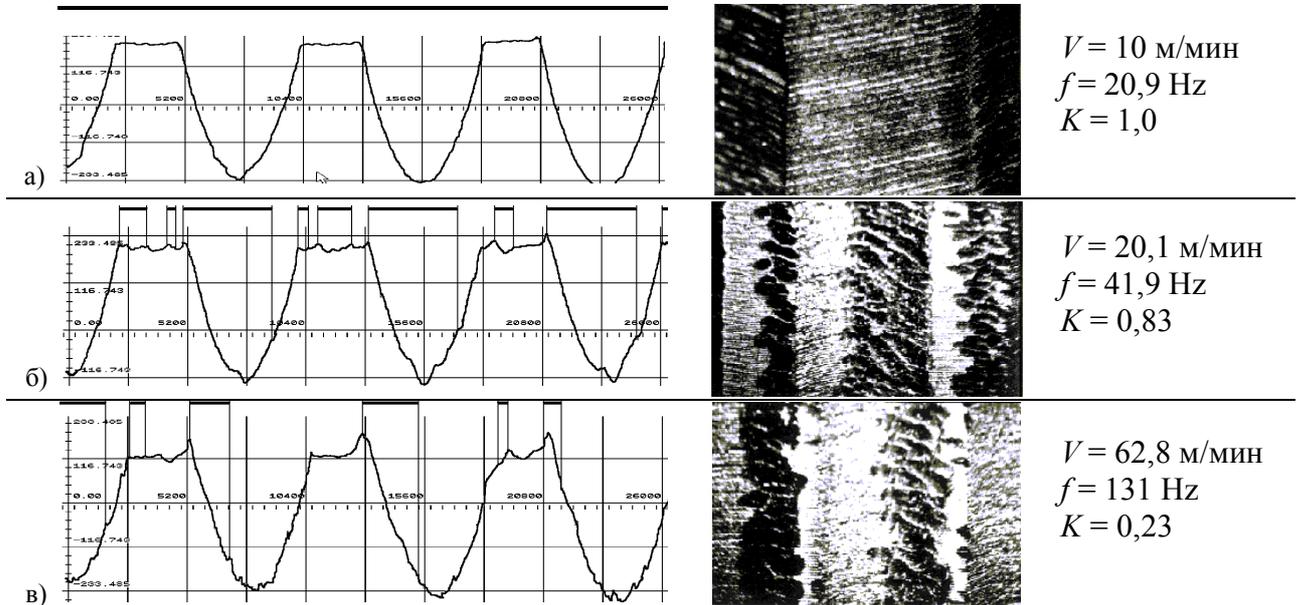


Рис. 4. Фрагменты волнограмм и микрофотографий участков выглаженных волнистых поверхностей при шаге исходной волнистости $Smw = 5000$ мкм

Модель волнистости формировалась нанесением продольных канавок концевой фрезой диаметром 8 мм, ось вращения которой находилась под углом к оси Z станка. Ввиду особенностей кинематики процесса модель волнистости отличалась от синусоидальной формы и имела вершину радиуса R_B и цилиндрическую впадину $R_{ВП}$, причём $R_B \gg R_{ВП}$.

Реализация АВ проводилась в диапазоне скоростей обработки от 10 до 80 м / мин при диаметре вращения индентора 40 мм. При шагах волнистости 5500 и 8000 мкм выбранный диапазон изменения скорости обеспечивает вариацию частот вынужденных колебаний индентора в пределах $f = 20,9 \dots 240$ Hz. Этот интервал включает резонансную частоту f_0 . Сила выглаживания составляла $Q = 30$ Н при радиусе алмазного индентора $r = 2$ мм. Подача во всех случаях поддерживалась постоянной: $S_0 = 0,1$ мм/об.

На фрагментах микрофотографий видны участки контактирования индентора с обработанной поверхностью. Линии над волнограммами соответствуют проекциям участков модели исходной волнистости, контактирующих с алмазным индентором при обработке.

Значения среднего коэффициента контактирования K свидетельствуют о том, что для выбранных условий моделирования средняя величина K с ростом частоты вынужденных колебаний индентора, вызванных наличием волнистости поверхности, монотонно снижается от $K = 1$ при $f = 20$ Hz до $K = 0,2$ при $f = 160$ и выше.

Для определения динамических характеристик процесса АВ цилиндрических поверхностей деталей предлагается модель, представленная на рис. 5.

Обрабатываемая поверхность детали 1, реальный профиль которой отличается от идеального (пунктир $\varnothing D$) на переменную случайную (отклонение от круглости) или закономерно изменяющуюся (обработка поверхности сложного профиля – кулачки и др.) величину Δ , воздействует на индентор 2, закреплённый в ползуне 3, перемещающемся в неподвижном корпусе 4, и поджимаемый к поверхности детали 1 пружиной 5 за счёт предварительного натяга Y_0 . Во время обработки со скоростью V за счёт наличия величины Δ система 2 – 3 – 5 будет совершать вынужденные колебания с соответствующей амплитуд-

но-частотной характеристикой.

Источником возмущений является изменение радиуса ρ обрабатываемой поверхности

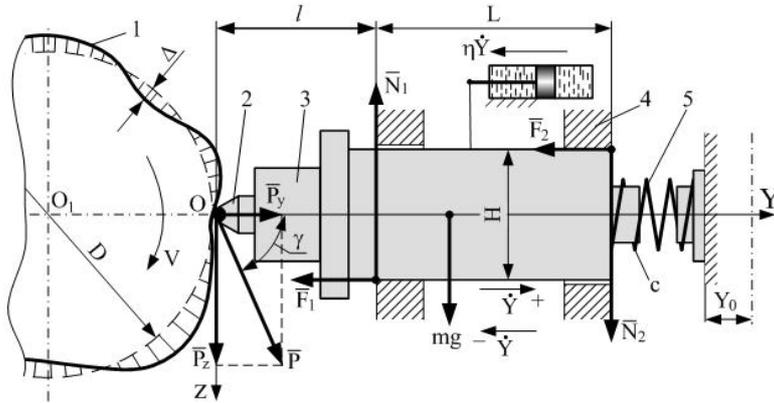


Рис. 5. Схема взаимодействия поверхности детали и индентора в процессе АВ

при вращении детали по оси O_1 , которое можно описать функцией $\rho(\varphi)$, где φ – угол поворота точки O поверхности детали.

При обработке ППД поверхностей деталей, имеющих отклонения формы, на устройство ППД как колебательную систему будут действовать вынужденные колебания, вызываемые возмущающей силой $P(t) = cf(t)$, где c – жёсткость пружины; $f(t)$ – кинематические возбуждения, например волнистость $Wmax$. Так как $\omega_0^2 = c/m$, уравнение вынужденных колебаний ползуна с учётом вязкого сопротивления имеет вид

$$\ddot{Y} + 2n\dot{Y} + \omega_0^2 Y = \frac{cf(t)}{m}.$$

Реальный профиль обрабатываемой поверхности 1 (рис. 5) является непрерывной дифференцируемой функцией, поэтому его можно представить в виде суммы синусоид путём разложения в ряд Фурье. Тогда для каждой гармоники величина $f(t)$ является гармоническим возмущающим колебанием, а $P(t) = cf(t)$ – гармонической возмущающей силой. Для этого случая она выражается уравнением

$$P = P_0 \sin(\omega t) = \frac{cf_0(t)}{m} \sin(\omega t),$$

а установившиеся колебания плунжера представляют собой уравнение $Y = a \sin(\omega t - \gamma)$, где

$$a = \frac{Y_{cm}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{4\omega^2 n^2}{\omega_0^4}}}; \quad tg\gamma = \frac{2\omega n}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (5)$$

Здесь $Y_{cm} = \frac{P_0}{c} = \frac{P_0}{m\omega_0^2}$.

Выражения (5) представляют собой амплитудно-частотную характеристику устройства. Коэффициент динамичности

$$\mu = \frac{a}{Y_{cm}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{4\omega^2 n^2}{\omega_0^4}}}.$$

Равенство $\omega = \omega_0$ соответствует резонансу, когда $\mu \rightarrow \infty$ и $a \rightarrow \infty$.

Из графиков на рис. 6 а видно, что силы вязкого сопротивления оказывают заметное действие лишь в околорезонансной области. Это позволяет в удалении от резонанса принимать для μ кривую, построенную без учёта вязкого сопротивления, а во всей околорезонансной области принимать $\mu = \mu_{max}$ (рис. 6 б).

Для получения наглядной картины процесса формирования АВ топографии обработанной поверхности при воздействии возмущений обрабатывались детали с поверхностями, моделирующими макроотклонения после предшествующей обработки. Образцы представляли собой кольца $\varnothing 50 \times \varnothing 40 \times 15$, которые обрабатывались на жёсткой цилиндриче-

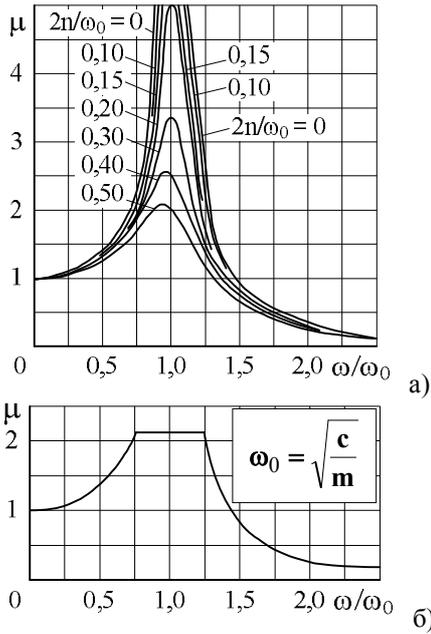


Рис. 6. Зависимости коэффициента усиления μ от отношения частот ω/ω_0 : а – с учётом сил сопротивления; б – упрощённая зависимость

мазного выглаживателя с обрабатываемой поверхностью: фазу полёта (контакт отсутствует); фазу контакта, в ходе которой идёт воздействие на обрабатываемую поверхность. Этот факт указывает на необходимость введения понятия технологической устойчивости процесса обработки ППД устройствами упругого действия.

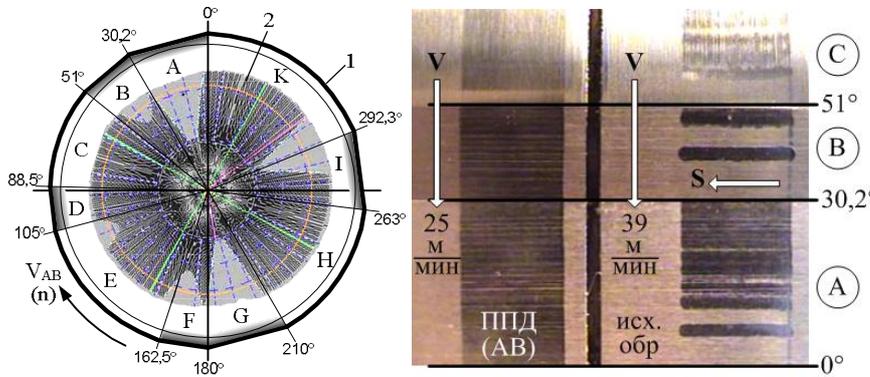


Рис. 7. Диаграмма с обозначением характерных участков модели с отклонениями от круглости, совмещённая с круглограммой, и типовая топография поверхности при ППД в зависимости от скорости V_{AB}

дѣжностью $P (R_i \in (\bar{R}_i \pm \delta \bar{R}_i))$. Потеря технологической устойчивости зависит как от внешних возмущений (состояние поверхности), так и от конструктивных и технологических факторов. Отсюда следует, что необходимо найти соответствующие критерии, обеспечивающие технологическую устойчивость процесса обработки ППД устройствами упругого действия.

На обрабатываемую поверхность со стороны индентора действует суммарная сила обработки, которая определяется соотношением

$$Q_{\Sigma} = c(Y_0 + Y) + m\ddot{Y}, \quad (6)$$

где Y_0 – величина предварительного поджатия; Y – текущая координата обрабатываемой поверхности; $m\ddot{Y}$ – сила инерции.

Уравнение волнистости:

ской оправке. Обработка поверхности осуществлялась на токарном станке. Макроотклонения создавались путём нанесения продольных лысок на плоскошлифовальном станке, причём высота сегментов снятого металла колебалась от 220 до 830 мкм. Алмазное выглаживание осуществлялось с силой $Q = 100$ Н. Масса подвижных частей устройства ППД $m = 1,16$ кг при жѳсткости пружины $c = 4,3 \cdot 10^3$ Н/м. Собственная частота колебаний подвижных частей устройства ППД составляла $\omega_0 \cong 60,9$ с⁻¹.

Диаграмма 1 с обозначением характерных участков отклонения поверхности от круглости и круглограмма 2 поверхности показаны на рис. 7. Там же указано направление скорости обработки при АВ V_{AB} .

Анализ показал, что отдельные участки поверхности имеют различную топографическую структуру. На рис. 7 показаны участки А, В, С образцов, обработанных со скоростью 25 и 39 м/мин. При обработке со скоростью 25 м/мин зоны выглаживания А, В, С имеют равномерную топографическую структуру. При обработке со скоростью 39 м/мин на поверхностях участков А, В, С наблюдаются характерные полосы, которые характеризуют два состояния контакта алмазного выглаживателя с обрабатываемой поверхностью: фазу полёта (контакт отсутствует); фазу контакта, в ходе которой идёт воздействие на обрабатываемую поверхность.

Технологическая устойчивость процесса ППД – это его способность непрерывно по всей обрабатываемой поверхности обеспечивать требуемый вектор \bar{R} параметров качества поверхностного слоя (включая эксплуатационные) в регламентированных границах ($\pm \delta \bar{R}$) с заданной на-

$$Y = \frac{W \max}{2} \sin\left(2\pi \frac{V}{Smw} t + \gamma_0\right).$$

При наличии контакта между обрабатываемой поверхностью и индентором соблюдается условие $P_Y = Q_\Sigma$, где P_Y – сила обработки ППД по оси Y .

Условием безотрывной обработки является $P_Y \geq 0$ или $Q_\Sigma \geq 0$, откуда с учётом допущения (6) получим для самого неблагоприятного случая ($\sin(\omega t + \gamma_0) = 1$):

$$Q_0 = cY_0 \geq m\ddot{Y}; \quad \frac{c}{m} Y_0 \geq a\omega^2, \quad \text{или} \quad \frac{c}{m} Y_0 \geq \frac{W \max}{2} \left(\frac{2\pi V}{Smw}\right)^2.$$

Условие безотрывной обработки ограничивает максимальную скорость обработки:

$$V_{\max} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \sqrt{\frac{(cY_0)Smw^2}{m W \max}}.$$

Это условие обеспечивает безотрывную обработку, но реальная сила выглаживания при этом колеблется в недопустимо широких пределах, что будет отрицательно сказываться на формируемых в процессе ППД параметрах качества поверхности. Поэтому следует задавать усилие обработки в некотором интервале $Q_\Sigma \in (Q_0 \pm \delta Q_0)$, где $1 \geq \delta \geq 0$.

Определение критической скорости обработки, обеспечивающей безотрывное движение индентора относительно обрабатываемой поверхности при ППД, удобно интерпретировать с помощью теоретически полученных на основе соотношения (7) диаграмм (рис. 8).

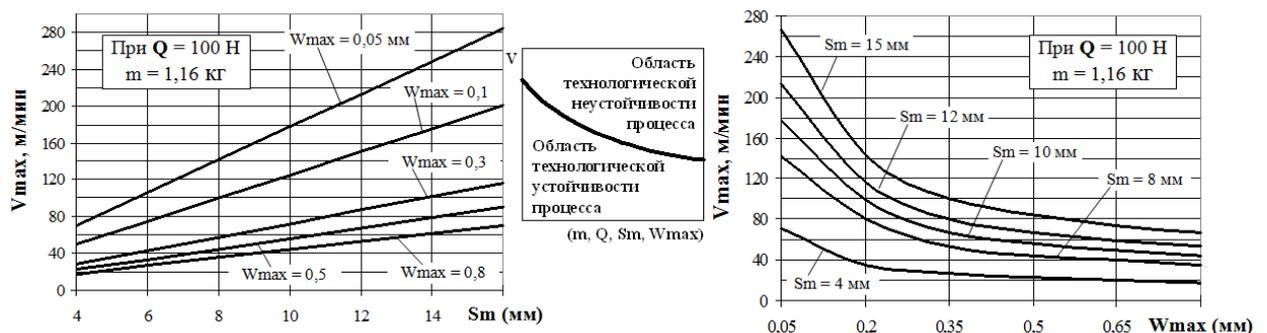


Рис. 8. Теоретические диаграммы для определения допустимой скорости обработки при ППД цилиндрических поверхностей, имеющих макроотклонения в виде волн W_{\max} , Smw

Таким образом, динамические модели процессов ППД поверхностей деталей инструментом упругого действия позволили получить критерии обеспечения технологической устойчивости обработки, которые связывают параметры волнистости исходной поверхности W_{\max} и Smw , конструктивные параметры устройств ППД m и c , допустимые относительные пределы вариации силы обработки δ и скорость V .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрешин, Д. И. Расширение функциональных возможностей металлорежущих станков с ЧПУ путем организации связи между ПЭВМ и УЧПУ при построении адаптивной системы управления / Д. И. Петрешин, О. Н. Федонин, В. П. Федоров, А. В. Хандожко, В. А. Хандожко // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 4. – С. 4-9.
2. Тотай, А. В. Технологическое обеспечение физико-химических свойств поверхностного слоя деталей машин / А. В. Тотай // Научно-технические проблемы в машиностроении. – 2012. – № 9. – С. 8-11.
3. Федоров, В. П. Технологическая устойчивость и параметры контактного взаимодействия индентора с поверхностью при финишной обработке ППД устройствами упругого действия / В. П. Федоров // Справочник. Инженерный журнал. – 2006. – № 4. – С. 4-8.
4. Федонин, О. Н. Научное обоснование выбора режимов обработки при поверхностном пластическом деформировании / О. Н. Федонин, С. В. Степешина // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 1. – С. 4-8.

Материал поступил в редколлегию 10.10.2014.