

УДК 621.787:621.91

**КОМБИНИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ
И ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ШЕЕК ВАЛОВ**

*канд. техн. наук, доц. А.М. ДОВГАЛЕВ, С.Н. БЛИЗНЮК
(Белорусско-Российский университет, Могилев)*

Рассматривается комбинированная обработка резанием и поверхностным пластическим деформированием шеек валов. Обоснован упругосиловой метод комбинированной обработки, позволяющий использовать упругие свойства технологической системы для повышения точности формообразования. На основе динамической модели упругосилового метода комбинированной обработки получены аналитические зависимости для выбора рациональных динамических параметров технологической системы, обеспечивающих гашение вынужденных колебаний в системе и повышение геометрической точности формообразования цилиндрических поверхностей.

Важнейшей задачей для машиностроителей является повышение производительности механической обработки на основе применения комбинированных методов обработки, позволяющих операции формообразования и обеспечения качественных характеристик поверхностного слоя детали совместить в один технологический переход [1].

Одним из эффективных методов комбинированной обработки является совмещенная обработка резанием и поверхностным пластическим деформированием (ППД), позволяющая в 2...3 раза увеличить производительность механической обработки, повысить усталостную прочность, контактную выносливость и износостойкость упрочненных деталей. При этом обеспечивается шероховатость поверхности Ra 0,63...0,10 мкм, упрочнение поверхностного слоя на глубину до 12 мм, в поверхностном слое детали формируются благоприятные напряжения сжатия [2 – 4].

Анализ существующих схем совмещенной обработки показывает, что они находят применение для упрочнения наружных и внутренних поверхностей вращения, а также плоских деталей, имеющих прямолинейную образующую. Совмещенная обработка резанием и ППД цилиндрических шеек ступенчатых валов затруднена или невозможна. Это связано с последовательностью вступления в работу режущего и деформирующего инструментов и наличием расстояния между их вершинами. В результате в конце рабочего хода, когда режущий инструмент доходит до торцевой поверхности ступени вала, на обрабатываемой шейке имеется участок, не упрочненный деформирующим инструментом. Кроме того, последовательное вступление в работу режущего, а затем деформирующего инструментов приводит к нагружению технологической системы силой деформирования в тот момент, когда режущий инструмент снимает с детали припуск на обработку. Возникающие под действием силы деформирования упругие отжатия элементов системы изменяют размер динамической настройки режущего инструмента и снижают точность формообразования поверхности [1 – 6].

Основная часть. На основе изложенного разработана новая высокопроизводительная методика совмещенной обработки резанием и ППД высокоточных цилиндрических поверхностей, в том числе шеек под подшипники, на станках токарной группы является актуальной задачей, так как позволяет исключить из технологических процессов изготовления валов операции шлифования шеек и существенно снизить себестоимость их изготовления [7].

Для решения поставленной задачи был разработан упругосиловой метод комбинированной обработки резанием и ППД высокоточных шеек валов, позволяющий использовать упругие свойства технологической системы для повышения размерной и геометрической точности [7, 8]. Метод осуществляют специальным упрочняющим инструментом, содержащим корпус 1, деформирующий элемент 2, подшипниковую опору 3, валик 4, ползун 5, ограничитель 6, силовую пружину 7, винт 8, гайку 9, упор 10, контргайку 11. Для реализации метода в условиях автоматизированного производства в системе управления предусмотрены: исполнительный механизм 12, устройство усиления 13, сравнивающее устройство 14, задающее устройство 15, датчик упругих перемещений 16, датчик измерения силы деформирования 17. Корпус 1 упрочняющего инструмента устанавливается в резцедержателе 18, а резец 19, имеющий прямолинейную режущую кромку 20 – в державке 21, жестко соединенной со станиной станка (рис. 1). Обрабатываемую деталь 22 закрепляют в центрах 23 станка. Режущий инструмент 19 и упрочняющий инструмент располагают с диаметрально противоположных сторон обрабатываемой шейки 24 детали 22. Прямолинейную образующую 20 режущего инструмента 19 размещают параллельно обрабатываемой шейке 24 на расстоянии N от оси 25 центров станка, величину которого определяют из соотношения:

$$N = \frac{D_{cp}}{2} + y, \quad (1)$$

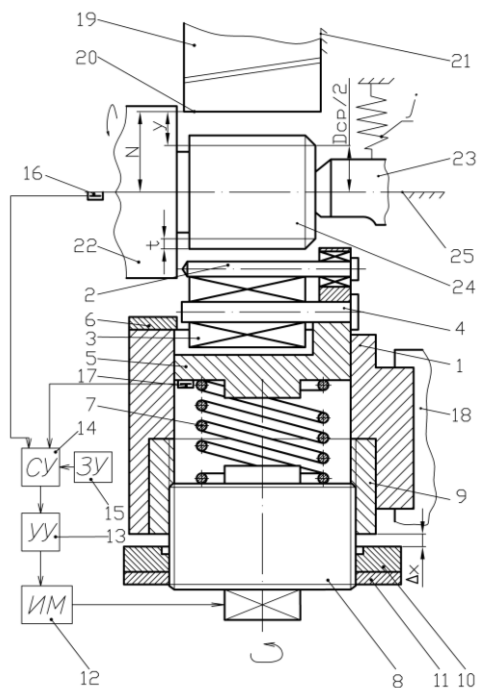


Рис. 1. Схема расположения элементов технологической системы до обработки

Исполнительный механизм 12 поворачивает винт 8 инструмента и осуществляет сжатие силовой пружины 7. Пружина 7, сжимаясь, смещает ползун 5 и обеспечивает деформирующему элементу 2 радиальное перемещение. Деформирующий элемент 2 входит в контакт с обрабатываемой поверхностью шейки 24 и осуществляет ее поверхностное пластическое деформирование. При этом изменение величины силы деформирования и упругое смещение детали 22 контролируют соответственно датчики 17 и 16. Показания датчиков 16 и 17, преобразованные в электрические сигналы, поступают в сравнивающее устройство 14, где электрические сигналы сравниваются с эталонными сигналами задающего устройства 15.

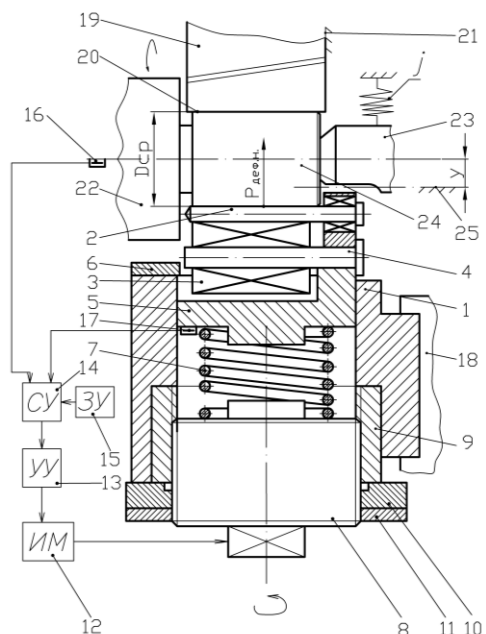


Рис. 2. Схема расположения элементов технологической системы после обработки

где y – величина упругого смещения центров станка в направлении режущего инструмента под действием номинальной величины силы деформирования, мм; D_{cp} – средний диаметр обработки, мм:

$$D_{cp} = (D_{max} + D_{min}) / 2.$$

Здесь D_{max} и D_{min} – соответственно наибольший и наименьший допустимые размеры обрабатываемой шейки, мм;

Величину упругого смещения центров станка под действием номинальной величины силы деформирования определяем из выражения:

$$y = \frac{P_{деф.н}}{j}; \tag{2}$$

где j – жесткость центров станка, Н/мм; $P_{деф.н}$ – номинальная величина силы деформирования, Н.

Подставив значение (2) в выражение (1), окончательно получим величину размера N статической настройки режущего инструмента:

$$N = \frac{D_{cp}}{2} + \frac{P_{деф.н}}{j}. \tag{3}$$

Детали 22 сообщают вращение. Нагружают деталь 22 силой деформирования, увеличивая ее до номинального значения.

Исполнительный механизм 12 в соответствии с величиной и знаком сигнала рассогласования изменяет величину силы деформирования и скорость упругого смещения детали 22 в направлении режущего инструмента 19. По мере увеличения силы деформирования возрастает значение упругого смещения детали 22 на режущий инструмент 19. В определенный момент времени резец 19 касается обрабатываемой шейки 24 и начинает снимать припуск на обработку. Происходит совмещенная обработка шейки 24 резанием и ППД. В момент совмещения во времени процессов резания и поверхностного пластического деформирования исполнительный механизм 12 переходит на новый режим работы и в соответствии с программой задающего устройства 13 обеспечивает упругое смещение обрабатываемой детали 22 со скоростью V . Скорость V упругого смещения детали 22 выбирают в зависимости от свойств обрабатываемого металла и характеристик режущего инструмента (рис. 2). Когда сила деформирования достигает номинального значения $P_{деф.н}$, упругое смещение детали 22 прекращается. Режущий инструмент снимает предусмотренный на обработку припуск и калибрует поверхность шейки 24 в размер D_{cp} . С этого момента времени в контакте с обрабатываемой поверхностью шейки 24 находится только деформирующий элемент 2, осуществляющий окончательную отделочно-упрочняющую обработку.

Таким образом, все детали обрабатываемой партии нагружаются номинальной силой деформирования при одинаковой жесткости центров станка. Это приводит к стабилизации величины упругого смещения детали на режущий инструмент и повышению точности обработки [7].

Для описания упругих перемещений детали, режущего и деформирующего инструментов представим технологическую систему в виде механической системы, состоящей из сосредоточенных масс, соединенных упругими и диссипативными связями. Максимально упрощая расчетную схему, принимаем ее как трехмассовую. При этом полагаем, что массы исследуемых объектов сосредоточены в центре масс, а деталь, режущий инструмент и деформирующий узел упрочняющего инструмента осуществляют плоское колебательное движение (рис. 3). Станину станка считаем жестким неподвижным телом.

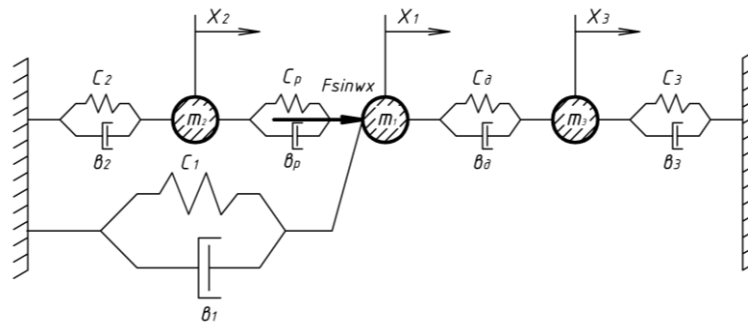


Рис. 3. Трехмассовая модель упругосилового метода комбинированной обработки резанием и ППД

В расчетной схеме используем следующие обозначения: m_1 – приведенная масса детали; m_2 – приведенная масса режущего инструмента; m_3 – приведенная масса деформирующего узла упрочняющего инструмента; c_1 – жесткость закрепления детали; c_2 – жесткость режущего инструмента; c_p – жесткость в зоне контакта детали и режущего инструмента; c_d – жесткость в зоне контакта детали и деформирующего инструмента; c_3 – жесткость деформирующего узла упрочняющего инструмента; ν_1 – коэффициент демпфирования в месте закрепления детали; ν_2 – коэффициент демпфирования в месте закрепления режущего инструмента; ν_p – коэффициент демпфирования в зоне контакта детали и режущего инструмента; ν_d – коэффициент демпфирования в зоне контакта детали и деформирующего узла упрочняющего инструмента; ν_3 – коэффициент демпфирования деформирующего узла упрочняющего инструмента; $F \sin \omega t$ – возмущающая сила, действующая на деталь (результатирующая возмущающей силы резания и деформирования за оборот детали).

За обобщенные координаты принимаем относительные перемещения масс, отсчитываемые от начала координат, расположенных в центре каждой массы.

Уравнения Лагранжа для рассматриваемой системы имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_1} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} - \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} + Q_{x_1}; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_2} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_2} - \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} + Q_{x_2}; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_3} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_3} - \frac{\partial \Phi}{\partial x_3} + Q_{x_3}. \end{cases} \quad (4)$$

где T , Π и Φ – соответственно кинетическая, потенциальная энергия и функция рассеивания системы; Q_{x_1} , Q_{x_2} , Q_{x_3} – обобщенные силы.

Запишем выражение для определения кинетической энергии системы:

$$T = \frac{1}{2} (m_1 \dot{x}_1^2 + m_2 \dot{x}_2^2 + m_3 \dot{x}_3^2).$$

При постоянной жесткости упругих элементов потенциальная энергия определяется из следующего выражения:

$$\Pi = \frac{1}{2} [c_1 x_1^2 + c_p (x_2 - x_1)^2 + c_d (x_3 - x_1)^2 + c_3 (x_2 - x_3)^2 + c_2 x_2^2].$$

Функция рассеивания системы равна

$$\Phi = \frac{1}{2} \left[b_1 \dot{x}_1^2 + b_p \left(\dot{x}_2 - \dot{x}_1 \right)^2 + b_d \left(\dot{x}_3 - \dot{x}_1 \right)^2 + b_3 \left(\dot{x}_2 - \dot{x}_3 \right)^2 + b_2 \dot{x}_2^2 \right].$$

Определим значение общих сил:

$$\delta x_1 \neq 0; \quad \delta x_2 = 0; \quad \delta x_3 = 0;$$

$$Q_{x_1} = \frac{\delta A}{\delta x_1} = \frac{F \sin \omega t \cdot \delta \cdot 1}{\delta x_1} = F \sin \omega t;$$

$$\delta x_1 = 0; \quad \delta x_2 \neq 0; \quad \delta x_3 = 0; \quad Q_{x_2} = 0;$$

$$\delta x_1 = 0; \quad \delta x_2 = 0; \quad \delta x_3 \neq 0; \quad Q_{x_3} = 0.$$

После подстановки в систему уравнений (4) вычисленных значений слагаемых запишем дифференциальные уравнения вынужденных колебаний масс в окончательном виде:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (b_1 + b_p + b_d) \dot{x}_1 + (c_1 + c_p + c_d) x_1 - b_p \dot{x}_2 - c_p x_2 - b_d \dot{x}_3 - c_d x_3 = F \sin \omega t; \\ m_2 \ddot{x}_2 + (b_2 + b_p) \dot{x}_2 + (c_2 + c_p) x_2 - b_p \dot{x}_1 - c_p x_1 = 0; \\ m_3 \ddot{x}_3 + (b_d + b_3) \dot{x}_3 + (c_d + c_3) x_3 - b_d \dot{x}_1 - c_d x_1 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Найдем частное решение системы уравнений (5), соответствующее установившимся вынужденным колебаниям. С этой целью полагаем, что:

$$\begin{aligned} x_1 &= A_1 \sin \omega t + \varphi_1; \\ x_2 &= A_2 \sin \omega t + \varphi_2; \\ x_3 &= A_3 \sin \omega t + \varphi_3. \end{aligned}$$

Исходя из последовательности вступления в работу режущего и деформирующего инструментов выбираем условия для частного решения системы уравнений (5), при которых обеспечивается гашение вынужденных колебаний в технологической системе [8].

1. В начале осуществления упругосилового метода комбинированной обработки, когда с поверхностью обрабатываемой шейки взаимодействует только деформирующий инструмент, предложено гашение колебаний в технологической системе обеспечить за счет выравнивания амплитуд колебаний детали и деформирующего узла упрочняющего инструмента и смещения фаз их колебаний на угол π :

$$A_1 - A_2 \sim 0; \quad \varphi_1 = \varphi_3 + \pi.$$

Минимизация колебаний детали обеспечивает плавное нагружение технологической системы силой резания при вступлении в работу режущего инструмента и приводит к повышению точности обработки.

Подставим значение $F \sin \omega t$ в следующем виде:

$$F \sin \omega t = F \sin [\omega t + \varphi - \varphi] = F \cos \varphi \sin \omega t + \varphi - F \sin \varphi \cos \omega t + \varphi.$$

Считаем, что

$$\varphi_1 = \varphi; \quad \varphi_3 = \varphi + \pi.$$

Решение уравнений (5) будем искать в следующем виде:

$$\begin{aligned} x_3 &= -A_3 \sin(\omega t + \varphi); \\ x_1 &= A_1 \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (6)$$

Подставив в первое уравнение системы (5) параметры (6), запишем:

$$\begin{aligned} & -m_1 A_1 \omega^2 \sin(\omega t + \varphi) + (b_1 + b_p + b_d) A_1 \omega \cos \omega t + \varphi + (c_1 + c_p + c_d) A_1 \sin(\omega t + \varphi) + \\ & + b_p A_2 \omega \cos(\omega t + \varphi) + c_p A_2 \sin(\omega t + \varphi) + b_d A_3 \omega \cos(\omega t + \varphi) + c_d A_3 \sin(\omega t + \varphi) = \\ & = F \cos \varphi \sin(\omega t + \varphi) - F \sin \varphi \cos(\omega t + \varphi). \end{aligned}$$

При равенстве значений при $\cos(\omega t + \varphi)$ и $\sin \omega t + \varphi$ имеем:

$$\begin{aligned} -m_1 A_1 \omega^2 + (c_1 + c_p + c_d) A_1 + c_p A_2 + c_d A_3 &= F \cos \varphi; \\ b_d A_3 \omega + (b_1 + b_p + b_d) A_1 \omega + b_p A_2 \omega &= -F \sin \varphi. \end{aligned} \quad (7)$$

Аналогично запишем для третьего уравнения системы (5):

$$\begin{aligned} m_3 A_3 \omega^2 \sin(\omega t + \varphi) - (b_d + b_3) A_3 \omega \cos(\omega t + \varphi) - (c_d + c_3) A_3 \sin(\omega t + \varphi) - \\ - b_d A_1 \omega \cos(\omega t + \varphi) - c_d A_1 \sin(\omega t + \varphi) = 0. \end{aligned}$$

После преобразования запишем:

$$\begin{aligned} m_3 A_3 \omega^2 - c_d + c_3 A_3 - c_d A_1 &= 0; \\ b_d A_1 \omega + b_d + b_3 A_3 \omega &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Пусть $A_1 = A_2 = A_3 = A$. Тогда из уравнений (7) и (8) получаем математические выражения для определения рациональных параметров системы: жесткости закрепления детали; приведенной массы и коэффициента демпфирования деформирующего узла упрочняющего инструмента:

$$c_1 = m_1 \omega^2 - 2c_p - 2c_d - ctg \varphi \cdot \omega \cdot b_1 + 2b_p + 2b_d; \quad (9)$$

$$m_3 = \frac{2c_d + c_3}{\omega^2}; \quad (10)$$

$$b_3 = 2b_d. \quad (11)$$

2. При совмещенной обработке шейки вала резанием и поверхностным пластическим деформированием гашение колебаний в технологической системе обеспечивается при равенстве амплитуд колебаний детали, режущего инструмента и деформирующего узла упрочняющего инструмента, смещении фаз колебаний детали и режущего инструмента на угол π и сближении фаз колебаний детали и деформирующего узла упрочняющего инструмента:

$$A_1 - A_2 \sim 0; \quad A_1 - A_3 \sim 0; \quad \varphi_1 = \varphi_2 + \pi; \quad \varphi_1 - \varphi_3 \sim 0.$$

В этом случае достигается стабилизация размера динамической настройки режущего инструмента и повышение точности формообразования.

Решения уравнений (5) при этих условия имеют вид:

$$c_1 = m_1 \omega^2 - 2c_p - ctg \varphi \cdot \omega \cdot (b_1 + 2b_p); \quad (12)$$

$$m_2 = \frac{2 \cdot C_p + C_2}{\omega^2}. \quad (13)$$

$$b_2 = 2b_p; \quad (14)$$

$$m_3 = \frac{2 \cdot c_3}{\omega^2}; \quad (15)$$

$$b_3 = 0. \quad (16)$$

3. В конце упругосилового метода комбинированной обработки, когда режущий инструмент снимет весь необходимый припуск на обработку, а в контакте с шейкой вала останется только деформирующий элемент, окончательно формирующий качественные характеристики поверхностного слоя, сле-

дует совместить фазы колебаний детали и деформирующего узла упрочняющего инструмента и выровнять по величине амплитуды их колебаний:

$$A_1 - A_3 \sim 0; \quad \varphi_1 - \varphi_3 \sim 0.$$

При этом обеспечивается постоянство натяга деформирования и, как следствие, повышение качественных характеристик упрочненной поверхности.

Решения уравнений системы (5), при данных условиях имеют вид:

$$c_1 = m_1 \omega^2 - 2c_p - ctg \varphi \cdot \omega \cdot (b_1 + 2b_p); \quad (17)$$

$$m_3 = \frac{2 \cdot c_3}{\omega^2}; \quad (18)$$

$$b_3 = 0. \quad (19)$$

Заключение. В работе представлен упругосиловой метод комбинированной обработки шеек валов, позволяющий использовать упругие свойства технологической системы для повышения точности формообразования. На основе разработки и анализа динамической модели процесса обработки получены аналитические зависимости для определения рациональных динамических параметров технологической системы, при которых обеспечивается гашение вынужденных колебаний детали, режущего и деформирующего инструментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов, А.Р. Многооперационные станки и системы с ЧПУ: обзор / А.Р. Маслов. – М.: Изд-во «ИТО», 2006. – 223 с.
2. Чистосердов, П.С. Комбинированные инструменты для отделочно-упрочняющей обработки / П.С. Чистосердов. – Минск: Беларусь, 1977. – 124 с.
3. Чистосердов, П.С. Комбинированные инструменты для совмещения процессов резания и поверхностного пластического деформирования / П.С. Чистосердов. – Минск: НИИмаш, 1975. – 45 с.
4. Чистосердов, П.С. Комбинированные инструменты для обработки поверхностей пластическим деформированием / П.С. Чистосердов, Г.С. Жуковец. – М.: ЦНИИТЭ строймаш, 1973. – 75 с.
5. Смелянский, В.М. Особенности размерообразования при совмещенном обкатывании / В.М. Смелянский, В.А. Васильев // Автомобильная промышленность. – 1982. – № 3. – С. 28 – 30.
6. Чистосердов, П.С. Управление точностью обработки при совмещении процессов резания и ППД / П.С. Чистосердов // Вестн. машиностроения. – 1985. – № 11. – С. 17 – 18.
7. Близнюк, С.Н. Малооперационные технологии изготовления валов с применением совмещенной обработки резанием и ППД / С.Н. Близнюк, А.М. Довгалев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Бел-Рос. ун-т, 2008. – С. 70.
8. Довгалев, А.М. Управление колебаниями при упругосиловом методе комбинированной обработки / А.М. Довгалев, С.Н. Близнюк // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Бел-Рос. ун-т, 2008. – С. 89.

Поступила 23.03.2009