

0,1...0,2 мм, и имели параметр шероховатости  $Ra$  0,12. На рабочих кромках калибра были сняты фаски  $0,3 \times 45^\circ$  для направления и его самоустановки по пазу.

После калибрования пазов отклонение их размеров по ширине составило 0,015 мм, что соответствует седьмому качеству (на 2 качества выше требуемой точности). Параметры шероховатости боковых поверхностей пазов, подвергнутых отделочной обработке калиброванием, значительно снизились. Надежно обеспечиваются требования ГОСТа на их шероховатость.

Наличие заусенца на дне паза объясняется перемещением металла под действием калибра. Его размеры зависят от припуска на калибрование. Высота заусенца  $h$  увеличивается с 0,4 до 0,6 мм при возрастании припуска на ширину паза от 0,2 до 0,3 мм, а его ширина  $b$  при этом растет от 0,5 до 0,8 мм (рис.2).

В связи с тем что призматические шпонки имеют фаски размером  $0,6 \times 45^\circ$  или радиус такой же величины, а допуск глубины паза составляет 0,3...0,43 мм, не требуется специальных мероприятий для компенсации уменьшения глубины паза вследствие образования заусенца.

Усилие, необходимое для калибрования, определялось по показаниям силоизмерительного устройства гидравлического пресса. Для калибрования паза шириной 12 мм и длиной 50 мм с припуском 0,2...0,25 мм на ширину паза требовалось усилие 41 000...48 000 Н.

Для предварительного расчета усилия калибрования может быть использована зависимость

$$P = L \sigma_{cp} (0,5\Delta + 0,15t),$$

где  $L$  — длина периметра калибрования, мм;  $\sigma_{cp}$  — предел прочности материала на срез, МПа;  $\Delta$  — припуск на ширину паза, мм;  $t$  — глубина шпоночного паза, мм.

Расхождение фактического и расчетного усилий калибрования не превышает 10%.

УДК 621.941.2.02

П.С.ЧИСТОСЕРДОВ, канд.техн.наук,  
А.Н.ЖИГАЛОВ (ММИ)

### АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ ВАЛОВ

В Могилевском машиностроительном институте для размерно-чистовых и отделочных операций, выполняемых с помощью комбинированного инструмента (КИ), снабженного режущим и деформирующим элементами (РЭ и ДЭ), разработан способ точения, позволяющий при увеличении производительности процесса значительно повышать точность обработки валов. Сущность его заключается в компенсации возникающих в процессе обработки отклонений положения корпуса КИ относительно его базы путем автоматического регулирования усилия деформирования на технологической операции, совмещенных во

времени процессов резания и поверхностного пластического деформирования (ППД).

При совмещенной обработке (СО), когда в работе одновременно участвуют РЭ и ДЭ, возрастают суммарные силы, действующие на технологическую систему СПИД, что ведет к увеличению упругих отжатий и снижению точности размеров и формы обработанных поверхностей. Особенно это относится к СО неуравновешенными КИ, когда РЭ и ДЭ расположены рядом или под углом друг к другу [1].

В этом случае суммарная сила  $\Sigma P$ , действующая на систему СПИД, равна сумме силы резания  $P_p$  и усилия деформирования  $P_d$  в плоскости  $YOZ$ .

Упругое радиальное перемещение  $Y$  КИ относительно обрабатываемой заготовки зависит от радиальной составляющей суммарной силы  $\Sigma P_y$  и жесткости  $j$  системы СПИД:

$$Y = \frac{\Sigma P_y}{j} = \frac{P_{py} + P_{dy}}{j} \quad (1)$$

Из теории резания известно, что составляющую силы резания  $P_{py}$  можно находить по эмпирической формуле

$$P_{py} = C_{py} t^{x_{py}} S^{y_{py}} HB^{p_{py}} V^{n_{py}} \quad (2)$$

Так как  $P_{dz} = (0,07...0,12) P_{dy}$  [4], то

$$P_{dy} \approx P_d = pF_k \quad (3)$$

где  $p$  — среднее давление в зоне контакта ДЭ с обрабатываемой поверхностью;  $F_k$  — площадь пятна контакта ДЭ с обрабатываемой поверхностью.

Заменим в (1)  $P_{py}$  и  $P_{dy}$  соответственно (2) и (3):

$$Y = \frac{C_{py} t^{x_{py}} S^{y_{py}} HB^{p_{py}} V^{n_{py}} + pF_k}{j} \quad (4)$$

В связи с тем что у партии заготовок припуски (глубина резания  $t$ ) и физико-механические характеристики обрабатываемого материала (твердость  $HB$ ) колеблются в определенных пределах, составляющая силы резания также изменяется.

Колебание составляющих силы резания и усилия деформирования вызывает колебание упругих отжатий в системе СПИД. Разность максимальных и минимальных упругих отжатий, обуславливающих рассеивание размеров при обработке партии заготовок, определится из (4) в общем виде следующим выражением:

$$\Delta Y = \frac{C_{py} S^{y_{py}} V^{n_{py}} (t_{\max}^{x_{py}} HB_{\max}^{p_{py}} - t_{\min}^{x_{py}} HB_{\min}^{p_{py}}) + p(F_{k\max} - F_{k\min})}{j}$$

Для повышения точности СО, т. е. уменьшения поля рассеивания разме-

ров, необходимо, чтобы  $\Delta Y \rightarrow 0$ , а это значит, что суммарная сила  $\Sigma P$  для всех обрабатываемых заготовок должна быть неизменной.

Для сохранения постоянства  $\Sigma P$  при изменяющихся значениях  $P_p$  и  $P_d$  можно вводить соответствующий корректив за счет изменения усилия деформирования. Это условие можно в общем виде выразить следующим уравнением:

$$(P_p \pm \Delta P_p) + P_d \pm \Delta P_d \pm \Delta P'_d = \text{const} , \quad (5)$$

где  $\Delta P_p$  — изменение  $P_p$  в зависимости от припуска на заготовке и ее твердости;  $\Delta P'_d$  — увеличение или уменьшение усилия деформирования  $P'_d$  в зависимости от физико-механических свойств материала заготовки;  $\Delta P'_d$  — усилие деформирования, компенсирующее изменение суммарной силы  $\Sigma P$ .

При обработке заготовок КИ с упругой связью ДЭ с обрабатываемой поверхностью уравнение (5) примет вид

$$(P_p \pm \Delta P_p) + P_d \pm \Delta P'_d = \text{const}. \quad (6)$$

В этом случае  $\Delta P'_d$  должно быть равно  $\Delta P_p$  и направлено в сторону, противоположную действию силы  $P_p$ .

На погрешность размеров обработанных деталей, как известно, решающее влияние оказывает сила, действующая перпендикулярно к обрабатываемой поверхности, т. е. по оси  $OY$ . Следовательно, для повышения точности СО при изменяющихся значениях  $P_p$  и  $P_d$  необходимо проекцию суммарной силы  $\Sigma P$  на ось  $OY$  поддерживать постоянной для всей партии обрабатываемых заготовок.

На рис. 1 показана принципиальная схема системы адаптивного управления (САУ) при СО наружных цилиндрических поверхностей. СО осуществляется с помощью КИ, состоящего из резца 1 и деформирующего элемента 3, установленных в общем корпусе 2. Усилие деформирования создается пружиной 5, один конец которой упирается в регулировочный винт 6, а другой — в рычаг 4, передающий это усилие деформирующему элементу 3. Измерительные преобразователи  $D_1$  и  $D_2$ , контролирующие изменение проекции суммарной силы  $\Sigma P_y$ , преобразуют упругие перемещения, характеризующие протекание процесса в КИ, в удобную для последующих преобразований и управления физическую величину.

САУ включает в себя сравнивающее устройство (СУ), задающее устройство (ЗУ), исполнительный механизм (ИМ), который соединен с регулировочным винтом 6, действующим через пружину 5 на деформирующий элемент 3. ИМ в зависимости от величины и знака рассогласования вращает винт 6 в одну или другую сторону до тех пор, пока этот сигнал не достигнет минимально допустимого значения.

Для автоматизации процесса управления разработана САУ, в которой в качестве исполнительного механизма используется двигатель постоянного тока с тиристорным следящим электроприводом и тахогенератором, предназначенным для выработки сигнала обратной связи.

Недостатком САУ является то, что при изменении усилия деформирования изменяются и параметры шероховатости обработанной поверхности. Однако в связи со сравнительно небольшими колебаниями суммарной силы  $\Sigma P_y$  и плавным характером зависимости изменения высоты микронервно-

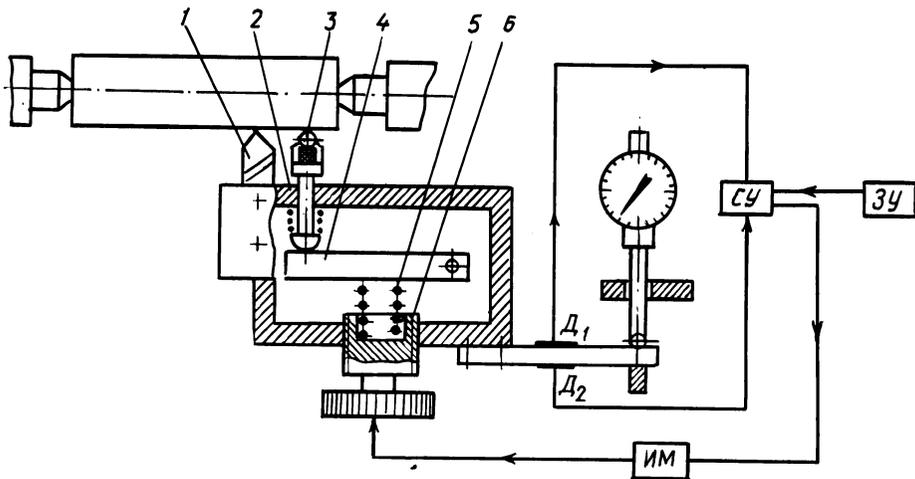


Рис. 1. Принципиальная схема САУ при совмещенной обработке наружных поверхностей

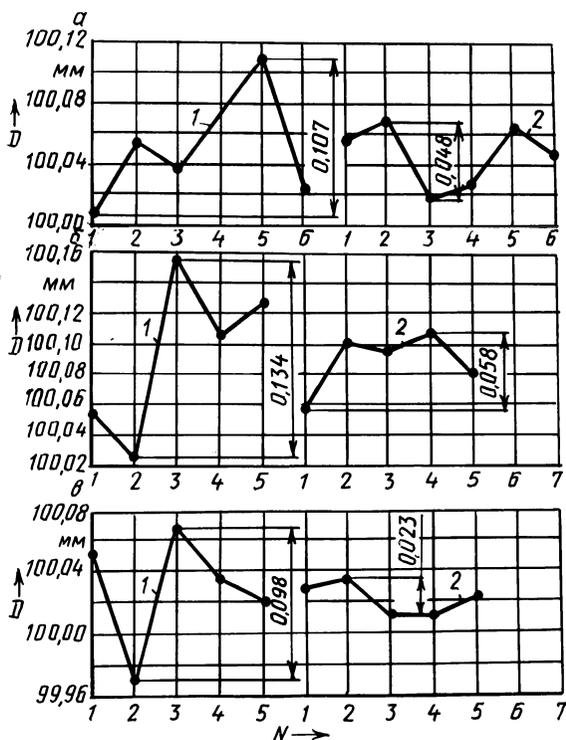


Рис. 2. Точечные диаграммы средних размеров валов:

*a* – БрАЖ9-4; *б* – сталь 45; *в* – ЧУ20; 1 – без САУ; 2 – с САУ; *N* – номер вала

стей от усилия деформирования изменения параметров шероховатости обработанной поверхности также незначительны и ими практически можно пренебречь.

На рис. 2 показаны точечные диаграммы средних диаметральных размеров валов, обработанных на токарно-винторезном станке 1К625, оснащённом КИ, без управления и с управлением точностью путем изменения упругих отжатий технологической системы СПИД за счет регулирования усилия деформирования. Сначала были обработаны три группы ступенчатых валов с колебанием припуска до 2,5 мм, выполненных из бронзы БрАЖ9-4, стали 45, чугуна СЧ20, с оптимальными режимами: для бронзы —  $v = 1,65$  м/с,  $S = 0,097$  мм/об,  $P_d = 450$  Н; стали —  $v = 1,65$  м/с,  $S = 0,15$  мм/об,  $P_d = 450$  Н; чугуна —  $v = 0,52$  м/с,  $S = 0,097$  мм/об,  $P_d = 150$  Н. Валы, изготовленные из бронзы, имели 6 ступеней, а из стали и чугуна — по 5 ступеней. Обработку деталей в таком же количестве с регулированием упругих перемещений производили на тех же режимах, что и при обработке без управления. Контроль за упругими перемещениями осуществлялся индикатором с ценой деления 1 мкм, поправка вносилась вручную.

Сравнение точечных диаграмм, построенных по данным обработки КИ без управления и с управлением точностью, показало, что во втором случае при прочих равных условиях разброс диаметральных размеров, вызванный отклонением упругого перемещения системы СПИД, уменьшился для бронзы в 2,3 раза, стали в 2,4 раза и чугуна в 4,3 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чистосердов П.С. Комбинированные инструменты для отделочно-упрочняющей обработки. — Минск, 1977. — 126 с. 2. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. — М., 1978. — 150 с.