

УДК 621.787.4

Р. Н. Шадура, канд. техн. наук, доц., П. А. Шацкий, В. Е. Панкратов

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТОЧНОСТЬЮ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ДОРНОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ

В работе расчетно-аналитическим методом получена зависимость для расчета точности при ультразвуковом дорновании, достоверность которой подтверждена экспериментально.

Влияние ультразвуковых колебаний на механизм пластического деформирования металлов при различных видах обработки достаточно широко исследовано отечественными и зарубежными учеными и обобщено в работах Ф. Блаха, Е. Г. Коновалова, А. И. Маркова, В. П. Северденко и др.

Наложение ультразвука на инструмент при обработке некоторыми способами поверхностного пластического деформирования (ППД) позволяет значительно повысить эффективность процесса [1, 2].

При наложении ультразвука на инструмент процесс деформирования отличается от статического, так как в этом случае происходит наложение динамических знакопеременных нагрузок на статические, и поглощение ультразвуковой энергии носит локальный характер, что в итоге обеспечивает облегчение пластической деформации.

Для ультразвукового дорнования (УЗД) применяли колебательную систему с незакрепленным инструментом (рис. 1).

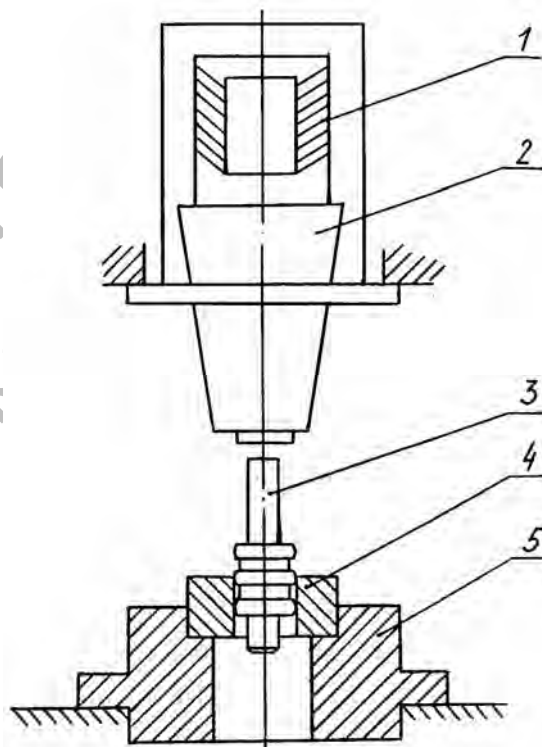


Рис. 1. Схема колебательной системы для дорнования отверстий: 1 – преобразователь; 2 – волновод; 3 – дорн; 4 – деталь; 5 – опора

При реализации такой системы необходимо, чтобы масса незакрепленного инструмента, по которому наносит удары резонансный волновод, была значительно меньше массы последнего. Такая система может нагружаться сравнительно небольшими статическими силами, в противном случае она выходит из резонанса. В результате выхода системы из резонанса под нагрузкой, происходит уменьшение амплитуды на торце волновода.

Проведенные ранее исследования показали, что колебательная система, настроенная в резонанс без нагрузки, уже при усилиях деформирования порядка 2...3 кН выходит из резонанса и, как результат, уменьшается амплитуда.

Для поддержания резонансного режима колебательных систем под нагрузкой в настоящее время разработан ряд способов, которые имеют различные степени эффективности.

Резонансный режим работы колебательной системы под нагрузкой обеспечивался за счет ее тарирования по методике [3].

В связи с тем, что результаты по обеспечению резонансного режима работы колебательной системы показали возможность эффективного использования этой схемы УЗД даже при значительных нагрузках, дальнейшие исследования были посвящены подтверждению эффективности этой схемы, выражающейся в повышении точности и качества обрабатываемых поверхностей по сравнению со статическим дорнованием (СД).

Процесс дорнования осуществляется за счет периодических ударов, которые наносит по инструменту 3 боек, ввернутый в торец концентратора, и таким образом осуществляется процесс микродеформации. Процесс происходит с огромными ускорениями, что обеспечивает создание значительных динамических усилий.

Суммарная погрешность УЗД может быть определена по зависимости,

полученной для СД [4]:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_m + \delta_x + \sqrt{\delta_k^2 + \delta_y^2 + 3\delta_u^2 + \delta_t^2}, \quad (1)$$

где δ_m – первичная погрешность, зависящая от механических свойств материала и исходной точности; δ_x – погрешность, зависящая от жесткости стенок деталей; δ_k – погрешность, возникающая в результате колебания механических свойств материала деталей; δ_y – погрешность установки заготовки для обработки; δ_u – приращение размера в результате размерного износа инструмента, допустимого при наименьшем предельном размере; δ_t – допуск на диаметральный размер инструмента.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования точности СД показывают, что действительная точность процесса определяется коэффициентами уточнения, не превышающими $\varepsilon = 1,4 \dots 1,6$. При использовании зависимости (1) следует иметь в виду, что первичные погрешности δ_m , δ_x , δ_k , δ_y будут рассчитываться для УЗД по зависимостям, отличающимся от зависимостей для СД. Это связано с тем, что зависимость остаточных деформаций от натягов при УЗД имеет иной характер по сравнению со СД.

Как видно из рис. 2, графическая зависимость остаточных деформаций от натягов при УЗД состоит из двух прямолинейных участков с различной крутизной. Большая крутизна первого участка объясняется сравнительно небольшими усилиями деформирования при малых натягах, и ударного импульса достаточно, чтобы обеспечить значительные деформации. При увеличении натягов $i > i_A$ растет и сопротивление деформирования, которое даже при неизменной величине ударного импульса уменьшает его относительную величину.

ну, выполняющую работу по деформированию, что приводит к уменьшению крутизны второго участка зависимости. Это явление несколько снижает эффективность УЗД.

Формирование первичных погрешностей δ_m , δ_k и δ_χ при УЗД и СД хорошо видно из рис. 2.

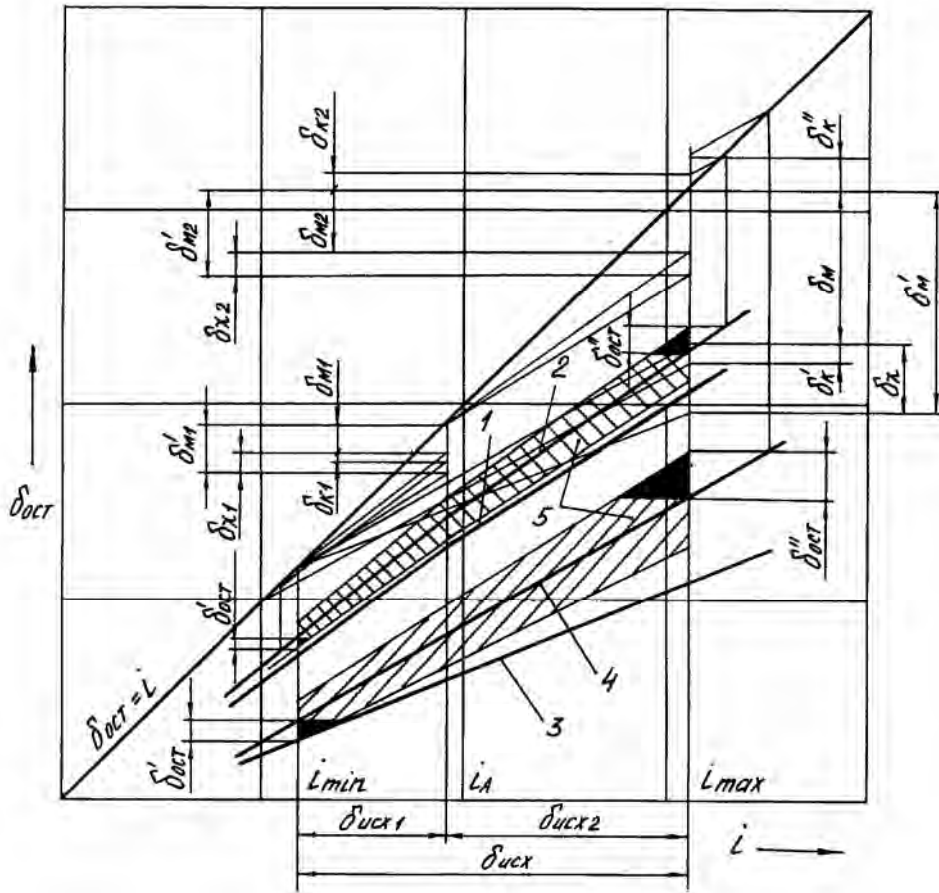


Рис. 2. Схема для расчета первичных погрешностей δ_m , δ_k и δ_χ : 1, 2, 3, 4 – зависимости остаточных деформаций от натягов для УЗД и СД при минимальной и максимальной жесткостях втулок; 5 – поле рассеяния действительных значений остаточных деформаций

Первичная погрешность δ_m^{UZD} при УЗД состоит из двух частей:

$$\delta_m^{UZD} = \delta_{m1} + \delta_{m2}. \quad (2)$$

Составляющие δ_{m1} и δ_{m2} будут определяться зависимостями:

$$\delta_{m1} = \delta_{уст1}(1 - C_1); \quad (3)$$

$$\delta_{m2} = \delta_{уст2}(1 - C_2). \quad (4)$$

Подставим (3) и (4) в (2) и введем коэффициент

$$K = \frac{\delta_{уст1}}{\delta_{уст}}.$$

Тогда получим

$$\begin{aligned} \delta_m^{UZD} &= K\delta_{уст}(1 - C_1) + (1 - K)\delta_{уст}(1 - C_2) = \\ &= \delta_{уст}(1 - KC_1 - (1 - K)C_2). \end{aligned} \quad (5)$$

Приняв $K_m^{UZD} = 1 - KC_1 - (1 - K)C_2$,

получим

$$\delta_m^{VЗД} = \delta_{исх} \cdot K_m^{VЗД}. \quad (6)$$

Первичная погрешность $\delta_k^{VЗД}$ при УЗД также состоит из двух частей (рис. 2):

$$\delta_k^{VЗД} = \delta_{k1} + \delta_{k2}, \quad (7)$$

где δ_{k1} и δ_{k2} определяются зависимостями:

$$\delta_{k1} = \frac{(1 - C_1) \delta'_{ocm}}{C_1}; \quad (8)$$

$$\delta_{k2} = \frac{(1 - C_2) \delta''_{ocm}}{C_2}. \quad (9)$$

Подставив (8) и (9) в (7), получим

$$\begin{aligned} \delta_k^{VЗД} &= \frac{(1 - C_1) \delta'_{ocm}}{C_1} + \frac{(1 - C_2) \delta''_{ocm}}{C_2} = \\ &= K_{k1}^{VЗД} \delta'_{ocm} + K_{k2}^{VЗД} \delta''_{ocm}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $K_{k1}^{VЗД} = \frac{1 - C_1}{C_1}$; $K_{k2}^{VЗД} = \frac{1 - C_2}{C_2}$.

Первичная погрешность $\delta_\chi^{VЗД}$ при УЗД, как видно из рис. 2, определяется следующим образом:

$$\delta_\chi^{VЗД} = \delta_{\chi1} + \delta_{\chi2}, \quad (11)$$

где $\delta_{\chi1} = K \delta_{исх} (C_1 - C'_1)$;
 $\delta_{\chi2} = (1 - K)(C_2 - C'_2) \delta_{исх}$.

Тогда

$$\delta_\chi^{VЗД} = \delta_{исх} K (C_1 - C'_1) + (1 - K)(C_2 - C'_2) \quad (12)$$

или

$$\delta_\chi^{VЗД} = K_\chi^{VЗД} \cdot \delta_{исх}, \quad (13)$$

где $K_\chi^{VЗД} = K(C_1 - C'_1) + (1 - K)(C_2 - C'_2)$.

Первичная погрешность $\delta_y^{VЗД}$ при УЗД будет определяться зависимостью

$$\delta_y^{VЗД} = \frac{\Delta T l \cdot K_m^{VЗД}}{d}. \quad (14)$$

Таким образом, полученные зависимости для расчета первичных погрешностей $\delta_m^{VЗД}$, $\delta_k^{VЗД}$, $\delta_\chi^{VЗД}$, $\delta_y^{VЗД}$ при УЗД

показывают на существенное снижение их влияния, на величину суммарной погрешности по сравнению со СД, т.к. $K_m^{VЗД} < K_m$; $K_k^{VЗД} < K_k$; $K_\chi^{VЗД} < K_\chi$.

Подставив полученные выражения первичных погрешностей (6), (10), (13) и (14) в (1) получим зависимость для расчета суммарной погрешности УЗД в развернутом виде:

$$\begin{aligned} \delta_\Sigma^{VЗД} &= \delta_{исх} (K_m^{VЗД} + K_\chi^{VЗД}) + \\ &+ \sqrt{(K_{k1}^{VЗД} \delta'_{ocm} + K_{k2}^{VЗД} \delta''_{ocm})^2 + \left(\frac{K_\chi^{VЗД} \Delta T}{d}\right)^2 + (3\delta_u)^2 + (T_\chi)^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, в результате теоретического анализа, расчетно-аналитическим методом получена зависимость для определения суммарной погрешности УЗД и ее первичных составляющих, которая позволяет прогнозировать обеспечение точности процесса УЗД.

Первое составляющее зависимости (15) представляет долю суммарной погрешности, унаследованную с предыдущей операции, а второе составляющее определяет долю собственных погрешностей УЗД в суммарной погрешности.

Обозначив второе слагаемое через $\delta_c^{VЗД}$, получим

$$\delta_\Sigma^{VЗД} = \delta_{исх} (K_m^{VЗД} + K_\chi^{VЗД}) + \delta_c^{VЗД}. \quad (16)$$

Используя (16), можно получить зависимость для расчета коэффициента уточнения при УЗД в следующем виде:

$$\varepsilon_\Sigma^{VЗД} = \frac{\delta_\Sigma^{VЗД} - \delta_c^{VЗД}}{\delta_\Sigma^{VЗД} (K_m^{VЗД} + K_\chi^{VЗД})}, \quad (17)$$

которая позволит прогнозировать предполагаемую точность в процессе УЗД при полном проявлении первичных погрешностей.

Для исследований точности отверстий при УЗД использовалась установка, собранная на базе токарно-

винторезного станка 1К625 (рис. 3). Колебательная система 5 устанавливалась при помощи конического хвостовика в задней бабке, которая закреплялась на станине станка. Для установки детали,

силоизмерительного устройства и других элементов, применяемых при исследованиях, предусмотрено специальное приспособление, которое закреплялось в резцедержателе суппорта.

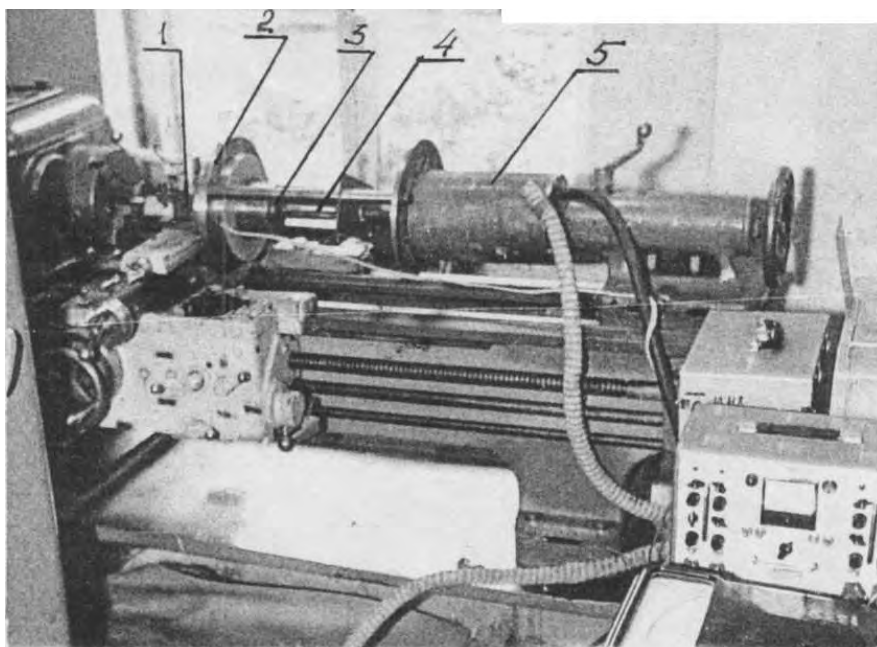


Рис. 3. Установка для УЗД отверстий: 1 – установочное устройство; 2 – силоизмерительное устройство; 3 – деталь; 4 – инструмент; 5 – колебательная система

Источником электрических ультразвуковых колебаний служит ультразвуковой генератор УЗГ-10 с обратной акустической связью и выходной мощностью 9,5 кВт. Колебательная система включает в себя магнитострикционный преобразователь ПМС-15А-18 номинальной мощностью 4 кВт, собственной частотой 18,75 кГц, преобразующий электрические колебания ультразвуковой частоты в механические. Для обеспечения усиления амплитуды применялись конические и ступенчатые концентраторы.

Исследования формирования точности при УЗД проводились для условий эффективного использования этой схемы дорнования по снижению статических усилий. Учитывая это, а также то, что доли остаточных деформаций в натягах при

УЗД значительно больше, чем при СД, можно рекомендовать для определения максимального натяга при УЗД партии деталей следующую зависимость:

$$i_{\max} = \delta_{исх} + \delta_{\phi} + 2R_{z_{исх}}, \quad (18)$$

где $\delta_{исх}$ – исходная точность обрабатываемых отверстий; δ_{ϕ} – предельная величина погрешностей формы; $R_{z_{исх}}$ – исходная шероховатость поверхностей отверстий по R_z .

Для исследований были изготовлены две выборки втулок (по 50 шт.) из бронзы БрА9Ж3 ГОСТ 493-79 (НВ 90-110). Действительная твердость материала оказалась НВ 83-117. Отверстия втулок обрабатывались до диаметра 12Н9 ($\delta_{исх} = 43$ мкм). Наруж-

ный диаметр втулок $D_n = 22$ и 26 мм, длина отверстия 16 мм. Дорнование осуществлялось с натягами $i = 0,03 \dots 0,073$ мм и $i_A = 0,055$ мм.

Сначала были получены зависимости остаточных деформаций от натягов при твердости материала втулок НВ100 (рис. 4).

Так как зависимости 2, 3 и участки зависимости 1 хорошо совпадают с прямыми, то при их аппроксимации были получены эмпирические уравнения для определения остаточных деформаций при СД и УЗД:

– для СД:

при $D_n = 26$ мм – $\delta_{ост} = 0,64 i - 0,003$,

при $D_n = 22$ мм – $\delta_{ост} = 0,59 i - 0,002$;

– для УЗД:

первый участок – $\delta_{ост} = 0,85 i - 0,002$ (при $D_n = 22$ мм и $D_n = 26$ мм),

второй участок – $\delta_{ост} = 0,66 i + 0,008$ (при $D_n = 22$ мм и $D_n = 26$ мм).

На основании этих данных были проведены расчеты первичных и суммарной погрешностей, определены ожидаемые коэффициенты уточнения УЗД и СД, которые сведены в табл. 1.

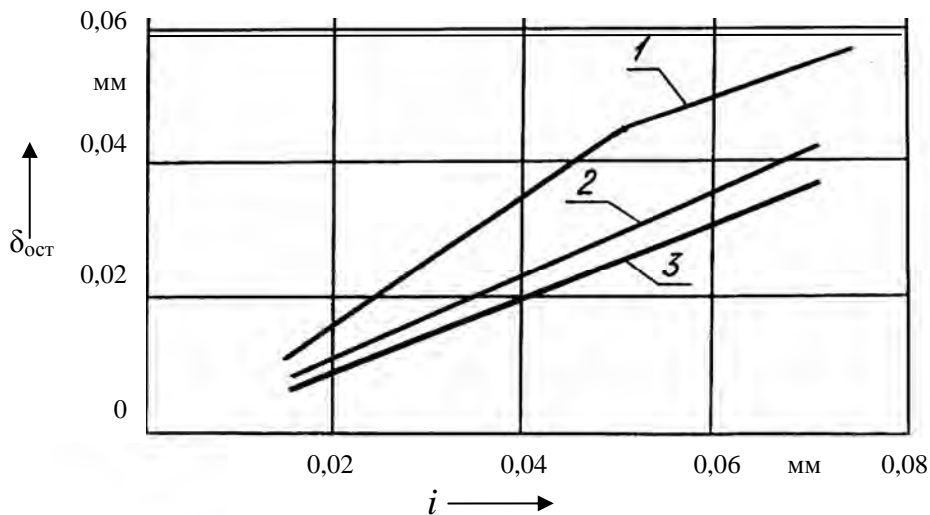


Рис. 4. Зависимость остаточных деформаций от натягов: 1 – при УЗД; 2,3 – при СД

Табл. 1. Результаты расчета точности дорнования

| Метод дорнования | Первичная погрешность | | | | | | В микрометрах | |
|------------------|-----------------------|------------------|------------|------------|------------|------------|-----------------|------------|
| | δ_m | δ_λ | δ_k | δ_y | δ_u | δ_r | δ_Σ | ϵ |
| СД | 16 | 2 | 10 | 4 | 0 | 6 | 30 | 1,43 |
| УЗД | 10 | 0 | 6 | 2 | 0 | 6 | 19 | 2,30 |

Дорнование отверстий втулок осуществлялось дорнами, изготовленными из стали Х12Ф (HRC 64-65). Наружный диаметр

втулок двух выборок $D_n = 22$ мм. В качестве смазывающего вещества использовали сульфифрезол Р.

После измерения размеров отверстий их результаты подвергались статистическим исследованиям и корреляционному анализу.

Оценку изменения точности размеров производили при помощи коэффициента уточнения $\varepsilon_d = S_x / S_y$, позволяющего качественно оценить это изменение.

Для оценки количественного влияния первичных погрешностей на формирование суммарной погрешности, с учетом технологической наследственности, устанавливались корреляционные связи погрешностей между операциями с определением коэффициентов корреляции r_{xy} и уравнений связи вида $y = a + bx$.

Для количественной оценки влияния технологической наследственности на

формирование суммарной погрешности УЗД предложены коэффициенты M и N .

Коэффициент M , определяющий долю дисперсии собственной погрешности в дисперсии выходной, определяется зависимостью

$$M = (1 - r_{xy}^2) 100 \% \quad (19)$$

Доля дисперсии, унаследованная от исходной погрешности в дисперсии выходной, определяется коэффициентом

$$N = r_{xy}^2 \cdot 100 \% \quad (20)$$

Результаты статистических исследований и корреляционного анализа точности отверстий после СД и УЗД представлены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты исследований точности УЗД и СД

В микрометрах

| Метод дорнования | S_x | \bar{X} | S_y | \bar{Y} | ε_d | TD = 6S | r_{xy} | Уравнение связи | M, % | N, % |
|------------------|-------|-----------|-------|-----------|-----------------|---------|----------|------------------|------|------|
| СД | 7,2 | 21,5 | 4,8 | 49,3 | 1,5 | 28,8 | 0,78 | $y = 0,52x + 38$ | 39 | 61 |
| УЗД | 7,6 | 22,6 | 3,2 | 62,4 | 2,4 | 19,2 | 0,70 | $y = 0,29x + 56$ | 51 | 49 |

Как видно из табл. 2, подтвердилось высказанное выше предположение об обеспечении точности отверстий при УЗД и СД. Полученные в результате экспериментов коэффициенты уточнения незначительно отличаются от рассчитанных по формулам.

Несущественное повышение точности при СД ($\varepsilon_d = 1,5$) объясняется большой долей унаследованных первичных погрешностей в суммарной ($N = 61$ %), в то время как при УЗД эта доля составляет $N = 49$ %. Таким образом, УЗД обеспечило более значительное повышение точности обработки отверстий ($\varepsilon_d = 2,4$) по сравнению со СД за счет снижения отрицательного влияния первичных погрешностей δ_m , δ_λ , δ_k и δ_y .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков, А. И. Ультразвуковое алмазное выглаживание деталей и режущего инструмента / А. И. Марков, И. Д. Устинов. – М. : Машиностроение, 1979. – 54 с.
2. Муханов, И. И. Импульсная упрочняюще-чистовая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом / И. И. Муханов. – М. : Машиностроение, 1978. – 44 с.
3. Куприянов, В. А. Исследование процесса прошивания отверстий малого диаметра с наложением ультразвуковых колебаний : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Свердловск : 1974. – 26 с.
4. Шадуно, Р.Н. Расчетно-аналитический метод определения точности при дорновании / Р. Н. Шадуно, В. В. Гапонов, П. А. Шацкий // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 276-282.

R. N. Shaduro, P. A. Shackii, V. E. Pankratov
Prediction and precision control
by the ultrasonic mandrelling of holes
 Belarusian-Russian University

In this work by means of calculating analytical method a relationship for precision calculation by ultrasonic mandrelling has been obtained. The reliability of this relationship has been verified by experiments.

УДК 621.97

Г. Ф. Шатуров, д-р техн. наук, В. А. Лукашенко, канд. техн. наук, доц.,
Д. Г. Шатуров

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ ТОКАРНОГО ИНСТРУМЕНТА

Рассмотрены вопросы закономерности изнашивания токарных резцов и выведены зависимости для определения погрешности при точении валов.

При обработке валов на токарных станках величина диаметральных размеров по мере перемещения резца вдоль обрабатываемой заготовки во многом зависит от упругой податливости элементов технологической системы и износа инструмента. Износ инструмента оказывает значительное влияние на формирование погрешности, особенно при обработке длинномерных валов. Из поверхностей резца, образующих лезвие, преимущественно изнашивается его задняя поверхность, имеющая наибольшую скорость перемещения относительно поверхности резания (рис. 1). Кривые износа задней поверхности инструмента от времени обработки могут иметь выпуклую или вогнутую относительно оси абсцисс форму (рис. 2) [1].

В общем случае кривая износа может быть аппроксимирована степенной функцией следующего вида [2]:

$$h_3 = \delta_o \left(\frac{\tau}{T_o} \right)^{n_o}, \quad (1)$$

где h_3 , δ_o – текущий и оптимальный износы задней поверхности резца, мкм; T_o –

период стойкости инструмента, мин; τ – время резания, мин; n_o – показатель степени при аналитическом определении величины линейного износа задней поверхности резца.

Максимальная величина износа задней поверхности резца $h_3 = \delta_o$.

Кривая износа задней поверхности резца состоит из двух отчетливо выраженных участков OA и AB (см. рис. 2). После точки A кривой износа происходит уменьшение ($n_o < 1,0$) либо увеличение ($n_o > 1,0$) интенсивности нарастания ширины площадки износа и наступает период нормального (замедленного) или ускоренного изнашивания инструмента в зависимости от величины показателя n_o .

Величина размерного износа инструмента меньше износа задней поверхности (см. рис. 1) и равна

$$\delta_p = h_3 \cdot K_p, \quad (2)$$

где

$$K_p = tq\alpha_s \frac{\sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}; \quad (3)$$