

УДК 621.787.4

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

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ДОРНОВАНИЯ**

В работе на основе анализа процесса формирования точности при дорновании отверстий предложена методика расчёта параметров инструментов, обеспечивающих заданную точность и расположение действительных размеров отверстий в пределах поля допуска по чертежу. Методика учитывает особенности формирования точности при традиционном, групповом и ультразвуковом дорновании. Проведенные испытания показали хорошую сходимость расчётных и экспериментальных результатов. Предложенная в работе методика прошла производственные испытания и может успешно применяться при проектировании инструментов для различных способов дорнования.

Обеспечение высокой точности и качества поверхностей отверстий дорнованием является одной из главных задач этого процесса.

Ограниченное применение на производстве дорнования отверстий вызвано отсутствием достаточно полных исследований в области формирования точности процесса, а отсюда и отсутствием пригодных для практического использования рекомендаций по обеспечению точности.

В [1] показано, что суммарная погрешность, или поле рассеяния полученных размеров  $\delta_{\Sigma}$ , является функцией независимых величин – первичных погрешностей дорнования, и может быть выражена зависимостью

$$\delta_{\Sigma} = f(\delta_m, \delta_k, \delta_{\chi}, \delta_y, \delta_u, \delta_T), \quad (1)$$

где  $\delta_m$  – погрешность выполняемого размера, зависящая от механических свойств материала обрабатываемых деталей;  $\delta_k$  – погрешность, возникающая в результате колебания механических свойств материала обрабатываемой партии деталей;  $\delta_{\chi}$  – погрешность, зависящая от жёсткости стенок деталей;  $\delta_y$  – погрешность установки заготовки для обработки на столе;  $\delta_u$  – погрешность размера в результате размерного износа инструмента;  $\delta_T$  – допуск на диаметральный размер инструмента.

Расчётно-аналитическим методом получены зависимости для определения первичных погрешностей процесса статического дорнования (СД) и зависи-

мость суммарной погрешности в развёрнутом виде

$$\delta_{\Sigma} = \delta_{исх} (K_m + K_{\chi}) + \sqrt{K_k (\delta'_{ост} + \delta''_{ит})^2 + \left( K_m \frac{\Delta T_1}{d} \right)^2 + (T_{\chi})^2 + (3\delta_u)^2}, \quad (2)$$

где  $K_m, K_k, K_{\chi}$  – коэффициенты, учитывающие влияние на точность механических свойств материала, их колебания и жёсткости обрабатываемых деталей;  $\delta_{исх}$  – исходная точность отверстий перед дорнованием.

Обозначив второе составляющее формулы (2) через  $\delta_e$ , после некоторых преобразований получим зависимость для расчёта исходной точности отверстий перед дорнованием:

$$\delta_{исх} = \frac{\delta_{\Sigma} - \delta_e}{K_m + K_{\chi}}. \quad (3)$$

Иногда более удобно при расчётах пользоваться коэффициентом уточнения  $\varepsilon$ , который может быть получен из зависимости (3):

$$\varepsilon = \frac{\delta_{исх}}{\delta_{\Sigma}} = \frac{\delta_{\Sigma} - \delta_e}{\delta_{\Sigma} (K_m + K_{\chi})}. \quad (4)$$

Таким образом, зная точность отверстий, заданную чертежом, приняв её за  $\delta_{\Sigma}$ , по формуле (3) можно определить величину необходимой исходной точности отверстий и по формуле (4) – уточ-

нение, обеспечиваемое в процессе СД.

Дорнование должно не только обеспечить заданную точность, но и точность расположения поля рассеяния действительных размеров после дорнования в пределах поля допуска, заданного чертежом детали.

Это условие может быть обеспечено инструментом (дорном), имеющим определённые размеры параметров.

Поэтому в работе поставлена задача – разработать методику расчёта параметров дорна, обеспечивающего заданную точность размеров отверстий и точность их расположения в пределах поля допуска по чертежу детали.

На рис. 1 показана связь между диаметром дорна  $D_u$  и предельными размерами отверстий до дорнования  $D_{1min}$  и  $D_{1max}$  и после –  $D_{2min}$  и  $D_{2max}$ .

Можно записать, что

$$D_u = D_{2min} + \delta_{упр.макс}; \quad (5)$$

$$D_u = D_{2max} + \delta_{упр.мин}, \quad (6)$$

где  $\delta_{упр.макс}$ ,  $\delta_{упр.мин}$  – предельные значения упругих деформации при определённых предельных значениях натягов:

$$\delta_{упр.макс} = i_{макс} - \delta_{ост.макс}; \quad (7)$$

$$\delta_{упр.мин} = i_{мин} - \delta_{ост.мин}, \quad (8)$$

где  $i_{макс}$ ,  $i_{мин}$  – предельные значения натягов при дорновании партии деталей;  $\delta_{ост.макс}$ ,  $\delta_{ост.мин}$  – предельные остаточные деформации, могут быть определены из рис. 1:

$$\delta_{ост.макс} = (i_{макс} - b) \cdot c; \quad (9)$$

$$\delta_{ост.мин} = (i_{мин} - b) \cdot c. \quad (10)$$

Согласно рис. 1 можно записать, что

$$i_{макс} = D_u - D_{1min}; \quad (11)$$

$$i_{мин} = D_u - D_{1max}. \quad (12)$$

Подставив выражения (7)...(12) в систему уравнений (5) и (8) и решив её, получим зависимость для расчёта диаметра калибрующих зубьев дорна:

$$D_u = \frac{D_{2min} + D_{2max} - (D_{1min} + D_{1max}) \cdot (1-c)}{2c} + b, \quad (13)$$

где  $b = \frac{a}{c}$ .

Таким образом, для расчёта диаметра калибрующих зубьев дорна при СД необходимо знать точность отверстий по чертежу и исходную, а также зависимость остаточных деформаций от натягов дорнования вида

$$\delta_{ост} = ci - a.$$

При групповом дорновании (ГД) [2], когда повышение точности дорнования обеспечивается за счёт повышения исходной точности, при этом не за счёт предварительной обработки, а за счёт сортировки деталей перед дорнованием на группы, по размерам отверстий с групповыми допусками, необходимо рассчитать диаметры дорнов для каждой группы. Расчёт можно производить по формуле (13), при этом для каждой группы рассчитываются групповые значения  $D_{1max}$  и  $D_{1min}$ .

Для этого необходимо определить групповую исходную точность по формуле

$$\delta_{исх}^{гр} = \frac{\delta_{\Sigma}^{ГД} - \delta_c^{ГД}}{K_m + K_x}.$$

Тогда исходная точность отверстий перед сортировкой на группы определяется по формуле

$$\delta_{исх} = \delta_{исх}^{гр} \cdot n,$$

где  $n$  – число групп сортировки.

Для ультразвукового дорнования (УЗД) [3], характер зависимости остаточных деформаций от натягов 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.

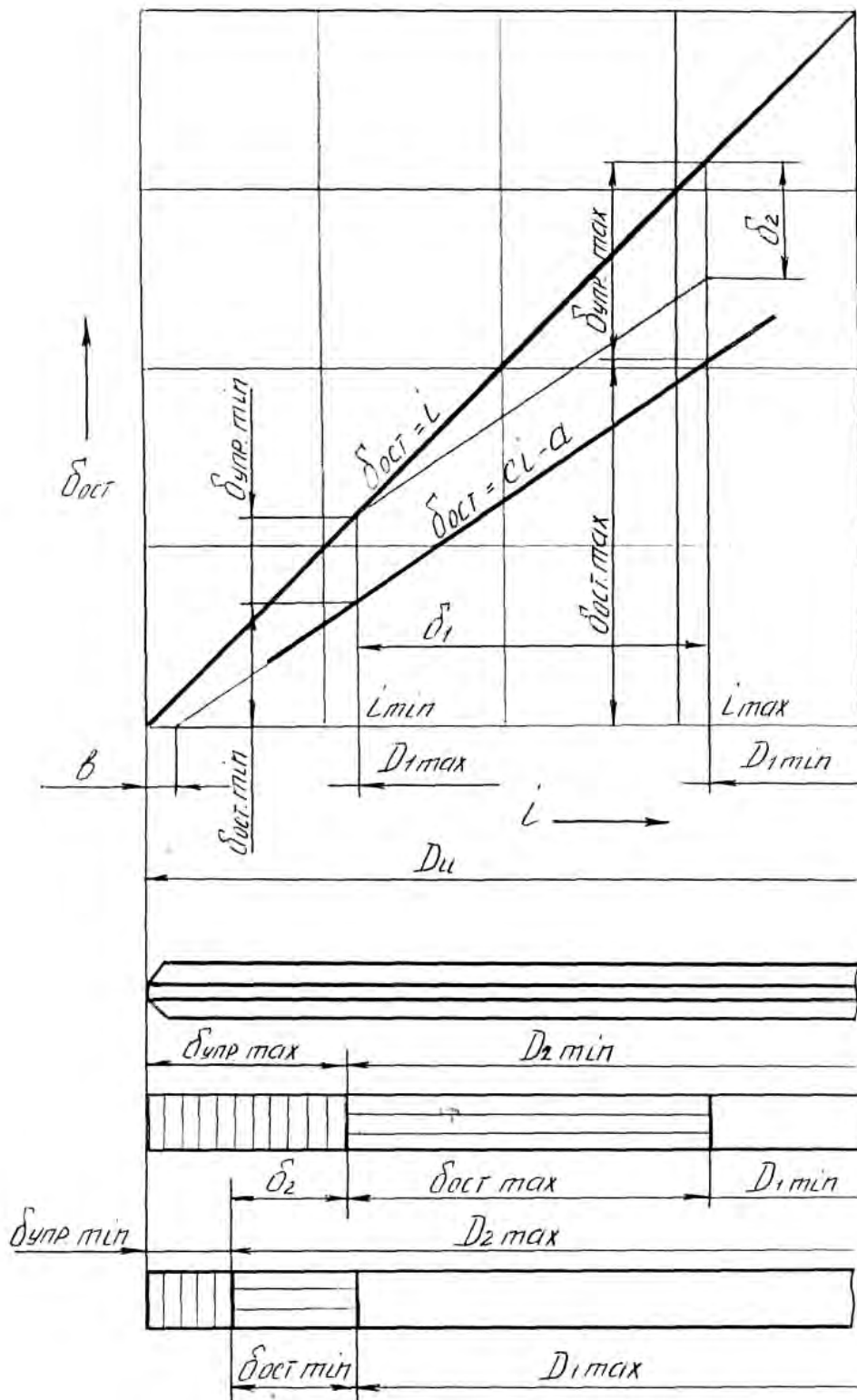


Рис. 1. Зависимость остаточных деформаций от натягов и схема изменения диаметров отверстий при СД

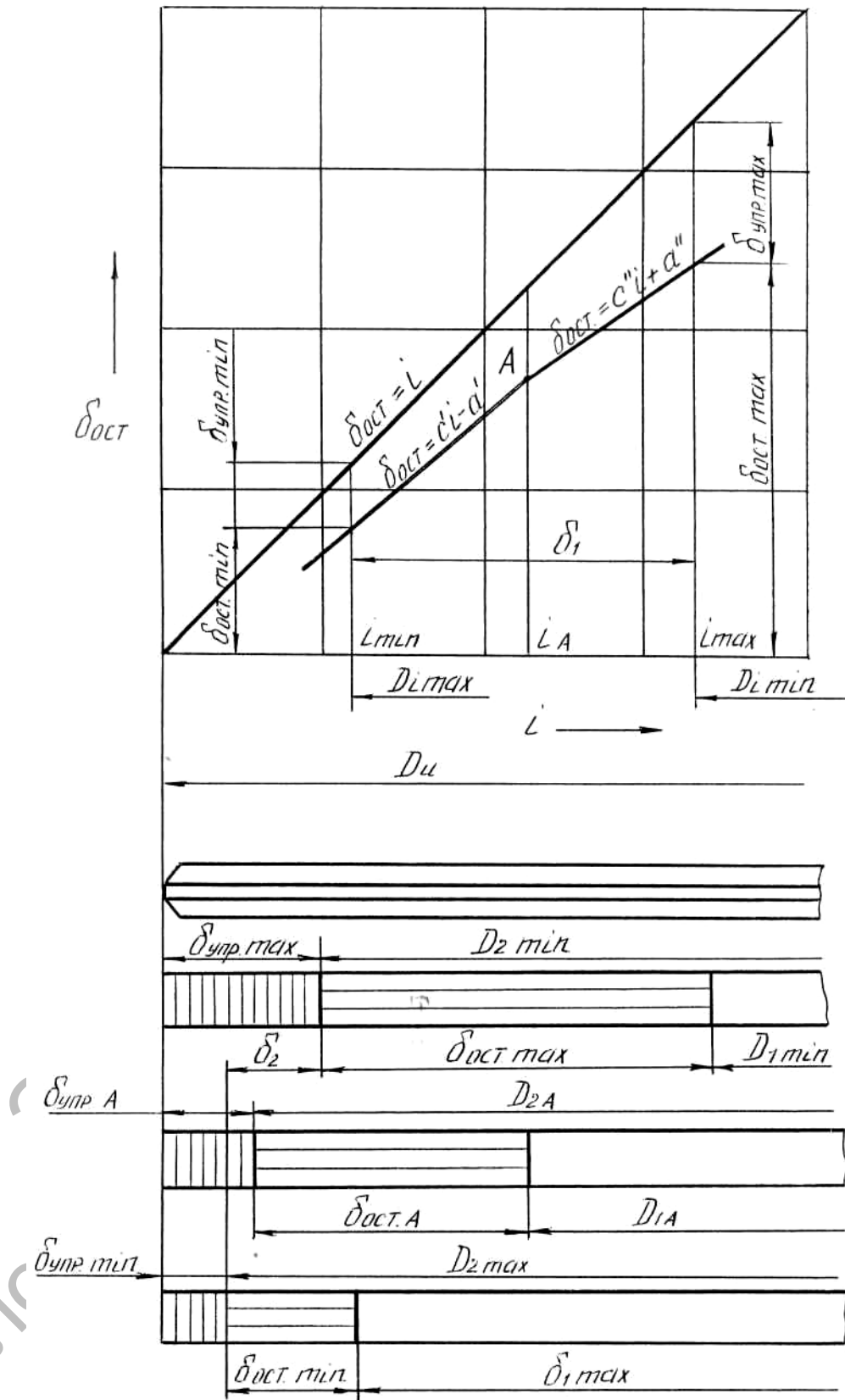


Рис. 2. Зависимость остаточных деформаций от натягов и схема изменения диаметров отверстий при УЗД

Большая крутизна первого участка объясняется сравнительно небольшими усилиями деформирования при малых натягах, и ударного импульса достаточно, чтобы обеспечить значительные деформации. При увеличении натягов  $i > i_d$  растёт и сопротивление деформирования, которое даже при неизменной величине ударного импульса уменьшает его относительную величину, выполняющую работу по деформированию, что приводит к уменьшению крутизны второго участка зависимости.

В [3] расчётно-аналитическим методом получена зависимость для УЗД аналогично (2) в следующем виде:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_{исх} (K_M^{узд} + K_{\chi}^{узд}) + \sqrt{(K_{\kappa 1}^{узд} \delta'_{ост} + K_{\kappa 2}^{узд} \delta''_{ост})^2 + \left(\frac{K_M^{узд} \Delta T_1}{d}\right)^2} + (3\delta_u)^2 + (T_x)^2. \quad (14)$$

Из зависимостей (2) и (14) видно, что точность после УЗД будет значительно выше по сравнению со СД, т. к.

$$K_M^{узд} < K_M; \quad K_{\kappa}^{узд} < K_{\kappa}; \quad K_{\chi}^{узд} < K_{\chi}.$$

Исходная точность при УЗД может быть рассчитана по формуле

$$\delta_{исх}^{узд} = \frac{\delta_{\Sigma}^{узд} - \delta_{\epsilon}^{узд}}{K_M^{узд} + K_{\chi}^{узд}}, \quad (15)$$

а коэффициент уточнения при УЗД можно определить следующим образом:

$$\epsilon = \frac{\delta_{\Sigma}^{узд} - \delta_{\epsilon}^{узд}}{\delta_{\Sigma}^{узд} (K_M^{узд} + K_{\chi}^{узд})}. \quad (16)$$

На основании рис. 2, сделав преобразования, аналогичные изложенным выше, получим зависимость для расчёта исполнительного размера дорна при УЗД в следующем виде:

$$D_u = (D_{2min} + D_{2max} - D_{1min} (1 - c'') - D_{1max} (1 - c') + a' - a'') / (c' + c''). \quad (17)$$

На основании полученных зависимостей разработана методика расчёта

диаметральных размеров инструментов, обеспечивающих заданную точность и необходимое расположение полей допусков при СД, ГД и УЗД.

Исходные данные:

- диаметр обрабатываемых отверстий, их точность (ТД);
- марка материала обрабатываемых деталей;
- зависимости остаточных деформаций от натягов;
- исходная шероховатость поверхностей отверстий ( $R_{зисх}$ );
- допуск биения базового торца;
- доля собственных погрешностей в суммарной ( $\delta_c$ ).

Последовательность расчёта:

1) рассчитывается исходная точность отверстий по формулам (3) или (15), приняв величину суммарной погрешности дорнования  $\delta_{\Sigma}$ ,  $\delta_{\Sigma}^{узд}$  равной ТД;

2) определяются предельные размеры  $D_{1max}$  и  $D_{1min}$ . Для СД и ГД эти размеры должны определять натяги, обеспечивающие оптимальную шероховатость при дорновании. Для УЗД эти размеры должны определяться из условия [3]

$$i_{max} = \delta_{исх} + \delta_{\phi} + 2R_{зисх},$$

где  $\delta_{\phi}$  – допуск погрешностей формы отверстий;

3) рассчитывается диаметральный размер дорнов по формулам (13) и (17);

4) определяются значения предельных натягов:

$$i_{max} = D_{и} - D_{1min}, \quad i_{min} = D_{и} - D_{1max};$$

5) принимается число деформирующих зубьев:

$$n_d = 3 \text{ при } i_{max} \leq 0,12 \text{ мм};$$

$$n_d = 4 \text{ при } i_{max} = 0,12 \dots 0,16 \text{ мм};$$

$$n_d = 5 \text{ при } i_{max} = 0,16 \dots 0,20 \text{ мм};$$

6) максимальные натяги распределяются между деформирующими зубьями по формуле

$$i_n = i_{max} \frac{\lg(n+1)}{\lg(n_d+1)};$$

7) определяются размеры деформирующихся зубьев:

$$D_{un} = D_n - i_{max} + i_n;$$

8) принимается число калибрующих зубьев (2, 3).

Для проверки эффективности предложенной методики в работе приведены расчёты параметров дорнов для обработки СД отверстий в размер  $12^{+0,03}$  и  $12^{+0,019}$  УЗД, сделано экспериментальное подтверждение при обработке втулок (50 штук) из бронзы БрА9Ж3 ГОСТ 493–79 (НВ90–110). Действительная твёрдость материала оказалась НВ83–117.

Наружный диаметр обрабатываемых втулок  $D_n = 22$  мм. Диаметр втулок оптимальной жёсткости при СД –  $D_n = 26$  мм, при УЗД –  $D_n = 20$  мм.

Исходная шероховатость обрабатываемых поверхностей  $R_a = 2,5$ , допуск торцового биения базового торца – 0,02 мм.

Зависимости остаточных деформаций от натягов имеют вид:

– для СД:

а) при  $D_n = 26$  мм

$$\delta_{ост} = 0,64i - 0,003;$$

б) при  $D_n = 22$  мм

$$\delta_{ост} = 0,59i - 0,001;$$

– для УЗД:

а) первый участок –

$$\delta_{ост} = 0,85i - 0,002;$$

б) второй участок –

$$\delta_{ост} = 0,68i + 0,008.$$

Исследования формирования точности при УЗД проводились для условий эффективного использования дорнования по схеме с незакрепленным инструментом по снижению статических усилий.

На основании приведенных данных по предложенной методике были проведены расчёты параметров дорнов, результаты которых приведены в табл. 1.

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. Источником электрических колебаний служит ультразвуковой генератор УЗГ–10, а механических колебаний – магнитоэлектрический преобразователь ПМС–15А–18.

Результаты экспериментов по обеспечению точности дорнования отверстий дорнами, параметры которого приведены в табл. 1, представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, результаты экспериментов подтвердили, что предложенная методика может успешно использоваться для расчёта параметров дорнов, обеспечивающих заданную точность и необходимое расположение полей рассеяния действительных размеров отверстий после СД и УЗД.

Табл. 1. Результаты расчёта параметров дорнов

| $TD = \delta_{\Sigma}$ , МКМ | $\delta_c$ , МКМ | $K_m$ | $K_x$ | $\delta_{исх}$ , МКМ | $\epsilon$ | $D_{1min}, D_{1max}$ , мм | $D_u$ , мм | $i_{min}, i_{max}$ , МКМ | $n_d$ | $i_1, i_2, i_3$ , МКМ | $D_{u1}, D_{u2}, D_{u3}$ , мм |
|------------------------------|------------------|-------|-------|----------------------|------------|---------------------------|------------|--------------------------|-------|-----------------------|-------------------------------|
| Для СД                       |                  |       |       |                      |            |                           |            |                          |       |                       |                               |
| 30                           | 12               | 0,36  | 0,05  | 43                   | 1,43       | 11,951<br>11,994          | 12,054     | 60<br>103                | 3     | 52<br>83<br>103       | 12,000<br>12,034<br>12,054    |
| Для УЗД                      |                  |       |       |                      |            |                           |            |                          |       |                       |                               |
| 19                           | 9                | 0,23  | 0     | 43                   | 2,30       | 11,942<br>11,985          | 12,015     | 30<br>73                 | 3     | 31<br>52<br>73        | 11,972<br>11,993<br>12,015    |

Табл. 2. Результаты исследований точности дорнования

В миллиметрах

| $D_{1max},$<br>$D_{1min},$ мм | $S_x$  | $\bar{x}$ | $TD_x = 6S_x$ | $D_{2max},$<br>$D_{2min},$ мм | $S_y$  | $\bar{y}$ | $TD_y = 6S_y$ | $\epsilon_{\delta}$ |
|-------------------------------|--------|-----------|---------------|-------------------------------|--------|-----------|---------------|---------------------|
| Для СД                        |        |           |               |                               |        |           |               |                     |
| 11,990<br>11,949              | 0,0072 | 11,967    | 0,0432        | 12,029<br>12,001              | 0,0048 | 12,016    | 0,0288        | 1,5                 |
| Для УЗД                       |        |           |               |                               |        |           |               |                     |
| 11,940<br>11,983              | 0,0076 | 11,962    | 0,0456        | 12,017<br>12,00               | 0,0032 | 12,0084   | 0,0192        | 2,4                 |

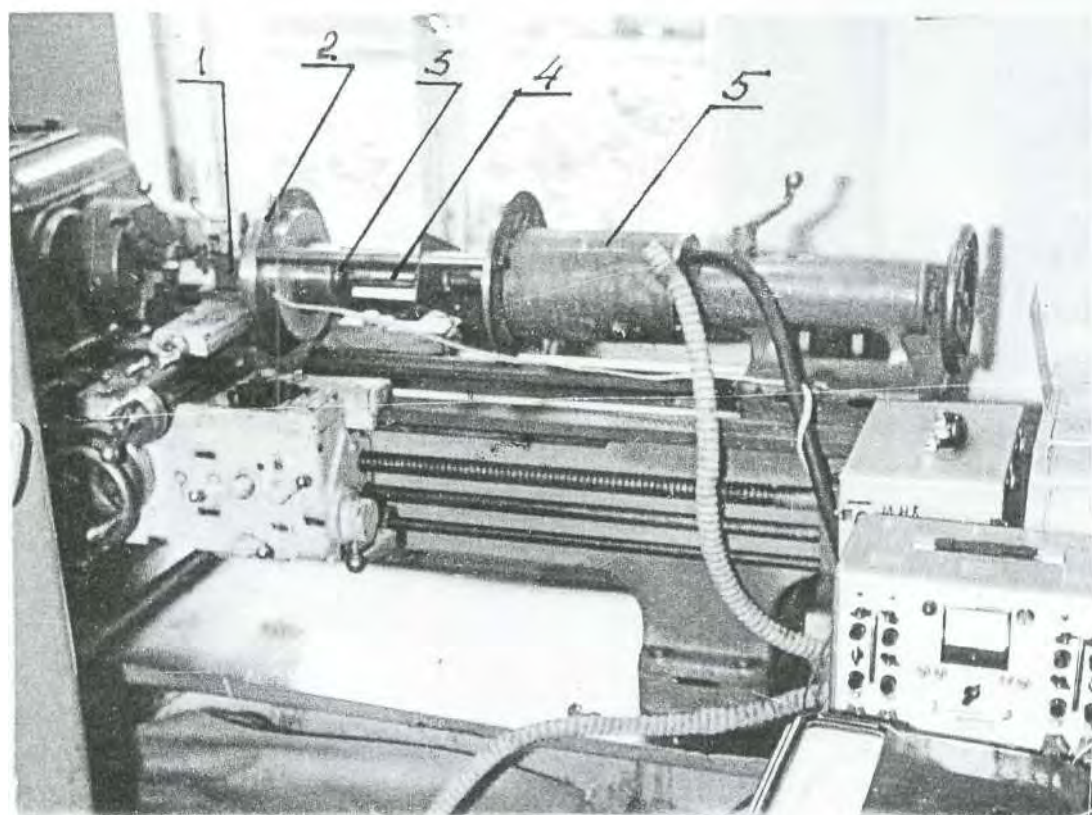


Рис. 3. Установка для УЗД

УЗД, за счёт введения в очаг деформации ультразвуковых колебаний, существенно снижает влияние ряда первичных погрешностей на точность процесса, по сравнению с СД, что подтверждается существенно отличающимися коэффициентами уточнения.

Для повышения эффективности УЗД необходимо разработать программное устройство, позволяющее стабилизи-

ровать и управлять амплитудой колебания в очаге деформации в зависимости от нагрузки и в результате этого обеспечить такую величину ударного импульса, чтобы крутизна зависимости остаточных деформаций от натягов на всех участках была максимально возможной, а точка А (см. рис. 2) максимально сместилась в сторону больших натягов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шадуро, Р. Н.** Расчётно-аналитический метод определения точности при дорновании / Р. Н. Шадуро, В. В. Гапонов, П. А. Шацкий // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 276–281.

2. **Шадуро, Р. Н.** Способы повышения точности дорнования отверстий / Р. Н. Шадуро,

П. А. Шацкий // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 282–286.

3. **Шадуро, Р. Н.** Прогнозирование и управление точностью при ультразвуковом дорновании отверстий / Р. Н. Шадуро, П. А. Шацкий, В. Е. Панкратов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2006. – № 3. – С. 281–288.

Белорусско-Российский университет  
РУПП «Станкозавод «Красный Борец»  
Материал поступил 25.12.2006

**R. N. Shaduro, V. E. Pankratov, P. A. Shuckii**  
**Tool-making support of different kinds**  
**of mandrelling**

Belarusian-Russian University  
RUPE «Machinetool plant «KRASNY BORETS»

On the basis of the analysis of the accuracy formation process in hole mandrelling, a design procedure of tool parameters providing assigned accuracy and arrangement of actual hole sizes within the tolerance zone on the drawing is proposed. The procedure takes into account particularities of accuracy formation in traditional, group and ultrasonic mandrelling. The tests carried out showed good agreement with designed and experimental results. The procedure stood tests in industry and can be recommended for successful application in tool design for different means of mandrelling.