

УДК 621.787.4

**Р.Н. Шадуро, канд. техн. наук, доц., В.В. Гапонов, П.А. Шацкий****РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРИ ДОРНОВАНИИ**

В работе приведена методика расчета суммарной погрешности дорнования отверстий и ее составляющих.

В машиностроении значительное распространение получили высокопроизводительные методы финишной обработки деталей машин поверхностным пластическим деформированием (ППД), в частности дорнованием, обеспечивающие повышение точности и качества поверхностей и существенное улучшение их эксплуатационных характеристик, определяемых ростом глубины и степени упрочнения, благоприятными величинами, знаком и характером распределения остаточных напряжений, а также изменением микроструктуры.

Обеспечение высокой точности отверстий дорнованием является одной из основных задач этого процесса. Однако, как показывает литературный анализ, теоретические и экспериментальные исследования в этой области почти отсутствуют.

Например, предлагаемая в [1] зависимость допуска отверстий после дорнования  $\delta_1$  от допуска предварительно подготовленных отверстий  $\delta$  выражается уравнением

$$\delta_1 = \frac{\delta}{1 + \frac{4D_H}{3} \left( 2 + \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) \frac{1}{3E}} \quad (1)$$

Оно может быть применено при дорновании гладких цилиндрических отверстий в режиме полной перегрузки. Авторы [2] отмечают, что при дорновании этих отверстий в полупругом режиме точность обработки может быть повышена на 30...80 %.

Автор [3] предлагает точность, обеспечиваемую дорнованием в полупругом режиме, оценивать зависимостью

$$\varepsilon = \frac{1}{(1 - C)K}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  - коэффициент уточнения при дорновании;  $C$  - коэффициент, определяющий долю остаточных деформаций в натяге, зависит от механических свойств обрабатываемого материала;  $K$  - коэффициент, учитывающий влияние на точность величины колебания механических свойств материала.

Зависимость остаточных деформаций от натягов при дорновании в полупругом режиме имеет вид  $\delta_{ост} = C\sigma - a$ .

Практические исследования точности при дорновании показывают, что действительная точность процесса определяется коэффициентами, не превышающими  $\varepsilon = 1,4...1,6$ .

Ограниченное применение на производстве дорнования отверстий вызвано отсутствием достаточно полных исследований в области формирования точности процесса, а отсюда и отсутствием рекомендаций, пригодных для практического использования по управлению точностью. Более глубокий анализ формирования точности при дорнова-

нии позволяет определить более широкий круг факторов, оказывающих отрицательное влияние на точность.

Поэтому в работе поставлена задача по выявлению факторов, оказывающих отрицательное влияние на формирование точности отверстий при дорновании, и определению суммарной погрешности процесса, которые позволят разработать системы управления точностью технологическими методами.

Процесс дорнования отверстий в полуупругом режиме показывает, что суммарная погрешность, или поле рассеивания получаемого размера  $\delta$ , является функцией независимых величин - первичных погрешностей дорнования, и может быть выражена зависимостью

$$\delta = f(\delta_M, \delta_K, \delta_X, \delta_Y, \delta_{И}, \delta_T), \quad (3)$$

где  $\delta_M$  – погрешность выполняемого размера, зависящая от механических свойств материала обрабатываемых деталей;  $\delta_K$  – погрешность, возникающая в результате колебания механических свойств материала в партии обрабатываемых деталей;  $\delta_X$  – погрешность, зависящая от жесткости стенок деталей;  $\delta_Y$  – погрешность установки заготовки для обработки на столе;  $\delta_{И}$  – приращение размера в результате размерного износа инструмента, допустимого при наименьшем предельном диаметре;  $\delta_T$  – допуск на диаметральный размер инструмента.

Суммарная погрешность выполняемого размера при дорновании может быть определена по формуле

$$\delta = \delta_m + \delta_x + t \sqrt{\lambda_K \delta_K^2 + \lambda_Y \delta_Y^2 + \lambda_{И} \delta_{И}^2 + \lambda_T \delta_T^2}, \quad (4)$$

где  $t$  – коэффициент, характеризующий процент риска получения брака при обработке (при  $P = 0,27\%$ ,  $t = 3$ );  $\lambda_K, \lambda_Y, \dots$  – коэффициенты, зависящие от формы кривых распределения соответствующих первичных погрешностей. Так как распределение случайных величин  $\delta_K, \delta_Y$  и  $\delta_T$  подчиняется нормальному закону, то  $\lambda_K = \lambda_Y = \lambda_T = 1/9$ ; распределение  $\delta_{И}$  подчиняется закону равной вероятности, для которого  $\lambda_Y = 1/3$ .

Формирование первичных погрешностей  $\delta_M, \delta_K, \delta_X$  хорошо видно из рис. 1.

Тогда суммарная погрешность обработки составит:

$$\delta = \delta_m + \delta_x + \sqrt{\delta_K^2 + \delta_Y^2 + 3\delta_{И}^2 + \delta_T^2}. \quad (5)$$

Рассмотрим влияние каждой первичной погрешности на формирование суммарной погрешности при дорновании.

Как видно из рис. 1 первичная погрешность  $\delta_M$  определяется зависимостью

$$\delta_m = \delta_{упр}^{\max} - \delta_{упр}^{\min}, \quad (6)$$

где  $\delta_{упр}^{\max}, \delta_{упр}^{\min}$  – максимальное и минимальное значения упругих деформаций при дорновании отверстий в партии деталей с шириной поля рассеяния  $\delta_{исх}$ .

Они определяются следующими выражениями:

$$\delta_{упр}^{\min} = i_{\min} - \delta_{ост}^{\min}; \quad (7)$$

$$\delta_{упр}^{max} = i_{max} - \delta_{ост}^{max}, \quad (8)$$

где  $i_{min}$  и  $i_{max}$  – минимальный и максимальный натяги при дорновании отверстий в деталях с шириной поля рассеяния  $\delta_{исх}$ ;  $\delta_{ост}^{max}$ ,  $\delta_{ост}^{min}$  – предельные остаточные деформации при натягах  $i_{min}$  и  $i_{max}$ .

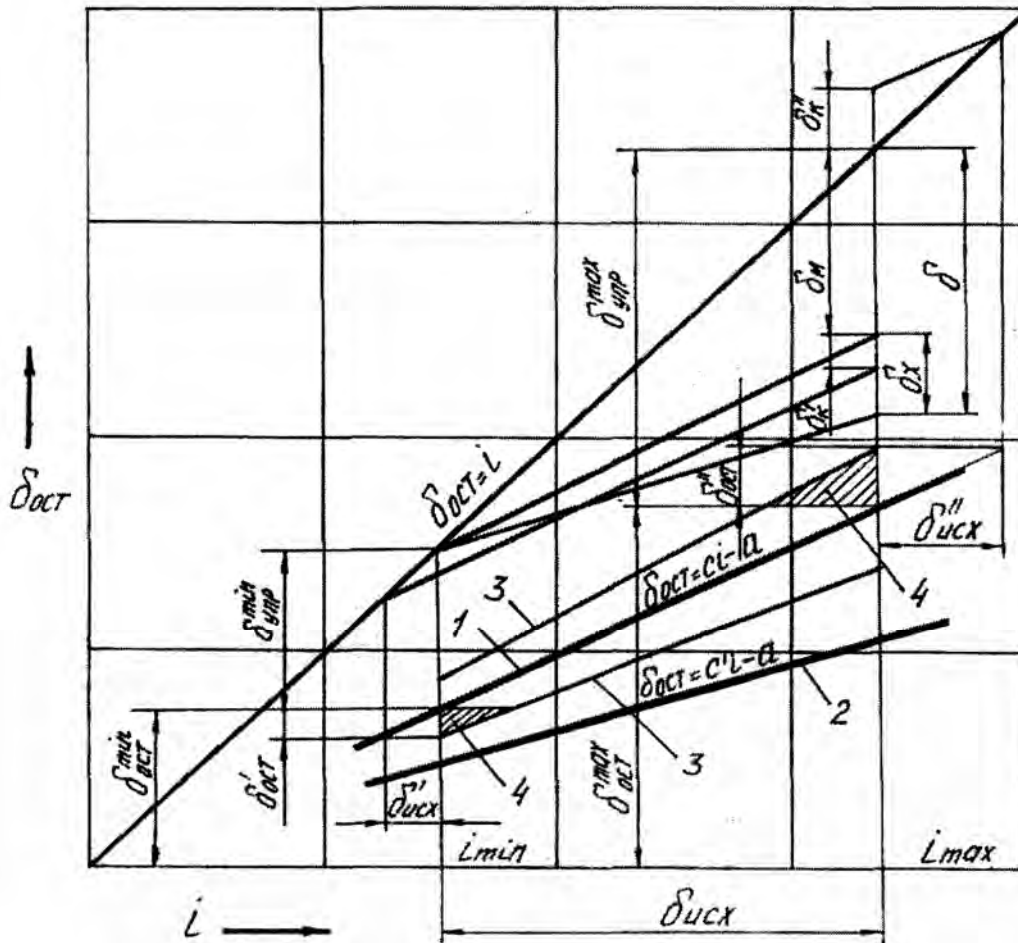


Рис. 1. К расчету первичных погрешностей  $\delta_m$ ,  $\delta_k$  и  $\delta_x$ : 1 - зависимость остаточных деформаций от натягов при максимальной жесткости стенок; 2 - зависимость остаточных деформаций от натягов при минимальной жесткости стенок; 3 - границы полей рассеяния остаточных деформаций; 4 - зоны рассеяния остаточных деформаций, обеспечивающих распределение действительных размеров в пределах полей  $\delta'_k$  и  $\delta''_k$

Подставив выражения (7) и (8) в (6), получим:

$$\begin{aligned} \delta_m &= i_{max} - \delta_{ост}^{max} - i_{min} + \delta_{ост}^{min} = \\ &= i_{max} - i_{min} - \left( \delta_{ост}^{max} - \delta_{ост}^{min} \right) = \delta_{исх} - \delta_{исх} \cdot c = \delta_{исх} (1 - C). \end{aligned} \quad (9)$$

Обозначив  $1 - C = K_M$ , получим выражение

$$\delta_M = K_M \delta_{исх} \quad (10)$$

Таким образом, первичная погрешность  $\delta_M$  полностью зависит от материала деталей, отверстия которых подвергаются дорнованию и исходной точности, т.е. она будет определяться конкретными значениями механических свойств материала, для которых получена зависимость 1 (см. рис. 1). Эта погрешность полностью наследуется из предыдущей операции.

В то же время при дорновании отверстий в партии деталей значения механических свойств материала этих деталей будут не одинаковыми.

Проведенные исследования показывают, что действительная величина колебания механических свойств материалов различного сортамента проката, изготавливаемого металлургической промышленностью, в большинстве случаев значительно шире (до 50 %) по сравнению с допустимыми значениями, установленными стандартами.

Поэтому остаточные деформации в процессе дорнования с натягами  $i_{\min}$  -  $i_{\max}$  будут отличаться от рассчитанных по зависимости 1 (см. рис. 1). Поля рассеяния действительных значений остаточных деформаций располагаются в зонах, ограниченных границами 3. Остаточные деформации, попавшие в незаштрихованные части этих зон, образуют действительные размеры отверстий, которые расположатся в пределах поля рассеяния  $\delta_M$ . Размеры отверстий, образованные остаточными деформациями заштрихованных зон, выйдут за границы поля рассеяния  $\delta_M$  и расположатся в пределах полей рассеяния  $\delta'_K$  и  $\delta''_K$ , которые и образуют погрешность  $\delta_K$ , т.е.

$$\delta_K = \delta'_K + \delta''_K \quad (11)$$

Согласно зависимости (9) и рис. 1 можно записать, что:

$$\delta'_K = \delta'_{исх} (1 - C); \quad (12)$$

$$\delta''_K = \delta''_{исх} (1 - C). \quad (13)$$

В то же время

$$\delta'_{исх} = \frac{\delta'_{ост}}{C}; \quad (14)$$

$$\delta''_{исх} = \frac{\delta''_{ост}}{C}. \quad (15)$$

Подставив (14) и (15) в (12) и (13), получим:

$$\delta'_K = \frac{\delta'_{ост}}{C} (1 - C); \quad (16)$$

$$\delta''_K = \frac{\delta''_{ост}}{C} (1 - C). \quad (17)$$

С учетом (16) и (17) зависимость (11) примет вид:

$$\delta_K = \frac{\delta'_{ост}}{C} (1 - C) + \frac{\delta''_{ост}}{C} (1 - C) = \frac{(\delta'_{ост} + \delta''_{ост})(1 - C)}{C}. \quad (18)$$

Обозначив

$$\frac{1-C}{C} = K_K,$$

получим

$$\delta_K = K_K (\delta'_{\text{ост}} + \delta''_{\text{ост}}). \quad (19)$$

Первичная погрешность  $\delta_x$ , как видно из рис. 1, определяется зависимостью

$$\delta_x = \delta - \delta_m, \quad (20)$$

где  $\delta = \delta_{\text{исх}} (1 - C')$ , тогда

$$\delta_x = \delta_{\text{исх}} (1 - C) - \delta_{\text{исх}} (1 - C') = \delta_{\text{исх}} (C - C'). \quad (21)$$

Обозначив

$$C - C' = K_x,$$

получим

$$\delta_x = K_x \cdot \delta_{\text{исх}}. \quad (22)$$

Первичная погрешность установки  $\delta_y$  определяется величиной торцового биения базового торца относительно оси отверстия, приводящего к перекоосу оси инструмента относительно оси отверстия в процессе дорнования, а следовательно, к изменению размера отверстия.

Она определяется зависимостью

$$\delta_y = \frac{\Delta T l (1 - C)}{d}, \quad (23)$$

где  $\Delta T$  - биение базового торца детали на диаметре  $d$ ;  $l$  - длина отверстия.

Первичная погрешность, определяемая допуском на диаметральный размер инструмента  $\delta_r$ , принимается равной допуску  $T_x$  на размер калибрующих зубьев, выполняемых по 5-6 квалитетам (ГОСТ 25.346-82).

Первичная погрешность, определяемая размерным износом инструмента  $\delta_{\text{и}}$  определяется в зависимости от допустимого износа при наименьшем предельном размере калибрующих зубьев. Часто лимитирующим фактором износа инструмента является обеспечение шероховатости нужной величины.

Подставив полученные выражения первичных погрешностей в (5), получим зависимость для расчета суммарной погрешности в развернутом виде:

$$\delta = \delta_{\text{исх}} (K_M + K_x) + \sqrt{(K_K (\delta'_{\text{ост}} + \delta''_{\text{ост}}))^2 + \left(K_M \frac{\Delta T l}{d}\right)^2 + (T_x)^2 + (3\delta_{\text{и}})^2}. \quad (24)$$

Таким образом, расчетно-аналитическим методом получена зависимость для определения суммарной погрешности дорнования и ее первичных составляющих, которые позволяют разработать системы управления точностью процесса.

Для управления точностью дорнования могут быть использованы следующие технологические методы.

1. Совмещение процесса дорнования с низкоэнергетическим воздействием ионами в вакууме (комбинированная обработка)
2. Дорнование отверстий с наложением ультразвука на инструмент (совмещенная обработка).

3. Совмещение процесса дорнования и ХТО (комбинированная химико-термическая обработка).

4. Групповое дорнование.

Предварительные исследования предложенных технологических методов позволили за счет снижения отдельных первичных составляющих суммарной погрешности обеспечить дорнованием коэффициенты уточнения  $\varepsilon = 2 \dots 3$  и выше.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Проскураков, Ю. Г.** Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов / Ю. Г. Проскураков. – М. : Машиностроение, 1971. – 208 с.
2. **Проскураков, Ю. Г.** Дорнование отверстий / Ю. Г. Проскураков. – М. : Машгиз, 1971. – 172 с.
3. **Шадуро, Р. Н.** Повышение качества шлицевых отверстий дорнованием на основе выявленных закономерностей технологической наследственности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Могилев : 1984. – 24 с.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 29.12.2005

**R.N. Shaduro, V.V. Gaponov, P.A. Shackiy**  
**Desing – analytical method for accuracy**  
**evaluation in burnishing by mandrel**  
Belarusian-Russian University

Design methods of the total error of mandrelling and its components are presented in the paper.