

УДК 621.787.4

Р. Н. Шадура, канд. техн. наук, доц., С. Н. Михеенко

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДОРНОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ НА ОСНОВЕ ВЫЯВЛЕНИЯ ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

В работе приведены результаты количественной оценки влияния первичных погрешностей на точность процесса дорнования. В качестве критериев оценки приняты суммарная погрешность дорнования и коэффициент уточнения. Установлено, что наибольшее влияние на точность дорнования оказывают исходная точность, колебание механических свойств материала деталей, жёсткость стенок и погрешность установки детали в процессе дорнования. В работе предложены мероприятия, позволяющие снизить отрицательное влияние первичных погрешностей на точность дорнования.

Непрерывно возрастающие требования к эксплуатационным свойствам деталей машин приводят к постоянному совершенствованию технологических процессов обработки с целью получения наилучшего их качества. Среди различных способов повышения эксплуатационных свойств деталей наиболее эффективным является поверхностное пластическое деформирование (ППД).

ППД повышает усталостную прочность, контактную выносливость и износостойкость поверхностей деталей.

Дорнование является одним из способов ППД, обеспечивающим существенное повышение качества отверстий. Дорнование упрочняет обрабатываемую поверхность отверстий вследствие улучшения физико-механических свойств металла и формирования в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия. К этому следует добавить улучшение качества поверхностей за счёт уменьшения высоты микронеровностей, имеющих округлённую вытянутую форму, что увеличивает площадь контакта с сопряжённой парой. Однако традиционное дорнование, как отмечено в [1], не может существенно повысить точность отверстий ( $\varepsilon = 1,4-1,6$ ).

Цель исследования: на основании расчётов и экспериментальных исследований изучить количественное влияние первичных погрешностей на точность дорнования, предложить мероприятия по расширению технологических возможностей процесса.

В [1] приведена зависимость для расчёта суммарной погрешности размеров отверстий при дорновании в общем виде

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

где  $\delta_m$  – первичная погрешность, зависящая от механических свойств материала и исходной точности;  $\delta_{\chi}$  – погрешность, зависящая от жёсткости стенок деталей;  $\delta_k$  – погрешность, возникающая в результате колебания механических свойств материала деталей;  $\delta_T$  – допуск на диаметральный размер инструмента;  $\delta_u$  – приращение размера в результате размерного износа инструмента.

В развёрнутом виде зависимость (1) имеет вид:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_{исх} (K_m + K_{\chi}) + \sqrt{\left(K_k (\delta'_{осм} + \delta''_{оум})\right)^2 + \left(K_m \frac{\Delta T l}{d}\right)^2 + (T)^2 + (3\delta_u)^2}, \quad (2)$$

где  $\delta_{исх}$  – исходная точность отверстий;  $K_m$  – коэффициент, учитывающий влияние механических свойств материалов,  $K_m = 1 - C$ ;  $C$  – коэффициент, определяющий долю остаточных деформаций в натяге дорнования при оптимальной жёсткости детали;  $K_{\chi}$  – коэффициент, учитывающий жёсткость стенок,  $K_{\chi} = C - C'$ ;  $C'$  – коэффициент, определяющий долю остаточных деформаций в натяге при жёсткости детали, меньше оптималь-

ной;  $\Delta T$  – биение базового торца детали;  $l$  – длина отверстия;  $T$  – допуск калибрующих зубьев дорна.

Первое слагаемое зависимости (2) представляет унаследованные погрешности с предыдущей операции, второе слагаемое (обозначим его  $\delta_c$ ) определяет долю собственных погрешностей в суммарной погрешности дорнования.

$$\delta_e = \sqrt{\left(K_x(\delta'_{ocm} + \delta''_{ocm})\right)^2 + \left(K_m \frac{\Delta T}{d}\right)^2 + (T)^2 + (3\delta_u)^2}. \quad (3)$$

Количественную оценку влияния первичных погрешностей размеров на точность дорнования производили для каждой погрешности, рассчитывая суммарную погрешность по зависимости (2), и коэффициент уточнения, которой определили по формуле [2]

$$\varepsilon_p = \frac{\delta_\Sigma - \delta_c}{\delta_\Sigma (K_m + K_\chi)}. \quad (4)$$

Табл. 1. Результаты расчёта влияния погрешности  $\delta_m$  на точность дорнования

В микрометрах

$\delta_{исх}$	Первичная погрешность		$\delta_n$	Первичная погрешность				$\delta_c$	$\delta_\Sigma$	$\varepsilon_p$
	$\delta_m$	$\delta_\chi$		$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_t$	$\delta_u$			
21	8	0	8	9	5	5	0	11	19	1,1
33	13	0	13	9	5	5	0	11	24	1,2
52	21	0	21	9	5	5	0	11	32	1,6
84	34	0	34	9	5	5	0	11	45	1,9

Как видно из табл. 1, с увеличением исходных погрешностей суммарные погрешности возрастают за счёт роста унаследованных погрешностей  $\delta_m$ . При этом коэффициент уточнения с увеличением исходных погрешностей увеличивается, что говорит о малой эффективности традиционного дорнования отверстий с высокой исходной точностью (7–8 квалитеты). Оценка влияния жёсткости деталей на суммарную погрешность оценивалась при относительной толщине стенок втулок  $\chi$ , равной 1,8; 1,6; 1,4;

Количественная оценка влияния каждой первичной погрешности на суммарную осуществлялась при постоянных значениях других по формулам [1]. Для исследований использовались втулки из стали 45 с диаметром отверстий  $D = 25$  мм, длиной отверстий  $l = 20$  мм и наружным диаметром  $D_n = 45$  мм. Была получена зависимость остаточных деформаций от натягов при оптимальной жёсткости детали ( $D_{H/D} = 1,8$ ),  $\delta_{ост} = 0,6$  и  $-0,004$  и НВ190.

Расчёт первичной погрешности  $\delta_m$  проводился для отверстий с различной исходной точностью 25Н7<sup>+0,021</sup>, 25Н8<sup>+0,033</sup>, 25Н9<sup>+0,052</sup>, 25Н10<sup>+0,084</sup>. Допуск торцового биения базового торца  $\Delta T = 0,03$  мм. Твёрдость материала втулок НВ 170–210.

В табл. 1 приведены результаты расчёта влияния исходной точности на суммарную погрешность дорнования.

1,2. Исходная точность отверстий  $\varnothing 25Н9^{+0,052}$ , НВ 170–210. Результаты расчёта влияния жёсткости деталей на суммарную погрешность дорнования приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, значение суммарной погрешности дорнования имеет минимальное значение при оптимальной жёсткости деталей. При уменьшении жёсткости суммарные погрешности увеличиваются, что соответственно приводит к уменьшению коэффи-

циентов уточнения процесса дорнования.

Таким образом, из табл. 1 и 2 видно, что значительная доля суммарной погрешности наследуется с предыдущей операции.

Влияние погрешности установки детали при дорновании оценивалось при различных значениях торцового биения базового торца детали  $\Delta T = 0,01-0,06$  мм. Исходная погрешность отверстий деталей принята  $25H9^{+0,052}$ ,  $\chi = 1,8$  и  $H7-210$ . Результаты исследований приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что увеличение

торцового биения базового торца в определённой степени увеличивает суммарную погрешность дорнования, что приводит к уменьшению коэффициентов уточнения.

Расчёты первичной погрешности  $\delta_k$  проводились при колебании механических свойств материала деталей  $HВ 150-239$ . Исходная точность отверстий принята  $25H9^{+0,052}$ , биение базового торца  $T = 0,03$  мм, жёсткость деталей  $\chi = 1,8$ . Результаты исследований приведены в табл. 4.

Табл. 2. Результаты расчёта влияния погрешности  $\delta_x$  на точность дорнования

В микрометрах

$\chi$	$\epsilon$	$K_x$	Первичная погрешность		$\delta_n$	Первичная погрешность				$\delta_c$	$\delta_\Sigma$	$\epsilon_p$
			$\delta_m$	$\delta_x$		$\delta_k$	$\delta_y$	$\delta_t$	$\delta_u$			
1,8	0,60	0	21	0	21	9	5	5	0	11	32	1,6
1,6	0,56	0,04	21	2,0	23	9	5	5	0	11	34	1,5
1,4	0,51	0,09	21	5,0	26	9	5	5	0	11	37	1,4
1,2	0,46	0,14	21	7,0	28	9	5	5	0	11	39	1,3

Табл. 3. Результаты расчёта влияния погрешности  $\delta_y$  на точность дорнования

В микрометрах

$\Delta T$	Первичная погрешность		$\delta_n$	Первичная погрешность				$\delta_c$	$\delta_\Sigma$	$\epsilon_p$
	$\delta_m$	$\delta_x$		$\delta_k$	$\delta_y$	$\delta_t$	$\delta_u$			
0,01	21	0	21	9	2	5	0	10	31	1,7
0,03	21	0	21	9	5	5	0	11	32	1,6
0,06	21	0	21	9	10	5	0	14	35	1,5

Табл. 4. Результаты расчёта влияния погрешности  $\delta_k$  на точность дорнования

В микрометрах

Колебание $HВ$	$\delta'_{ост}$	$\delta''_{ост}$	Первичная погрешность		$\delta_n$	Первичная погрешность				$\delta_c$	$\delta_\Sigma$	$\epsilon_p$
			$\delta_m$	$\delta_x$		$\delta_k$	$\delta_y$	$\delta_t$	$\delta_u$			
0	0	0	21	0	21	0	5	5	0	7	28	1,9
170-210	4	10	21	0	21	9	5	5	0	11	32	1,6
50-239	6	14	21	0	21	13	5	5	0	16	37	1,4

Как видно из табл. 4, существенное колебание механических свойств материала деталей приводит к значительному росту первичной погрешности  $\delta_x$ , а соответственно и суммарной  $\delta_\Sigma$ , что снижает коэффициент уточнения процесса дорнования.

Для подтверждения результатов расчётов проводились экспериментальные исследования для реальных условий проявления первичных погрешностей. Для исследований была принята выборка втулок (30 шт.) с отверстием  $\varnothing 25$  из стали 45, твёрдостью материала HB 170–210, жёсткостью стенок  $\chi = 1,6$  и торцевым биением  $\Delta = 0,03$  мм. Отверстия предварительно растачивались. Размах размеров отверстий втулок составил  $\Delta D = 50$  мкм (–10...–60), что соответствует 9-му качеству точности.

В результате расчётов получили:  $\delta_n = 22$  мкм,  $\delta_c = 12$  мкм,  $\delta_\Sigma = 34$  и  $\varepsilon_p = 1,5$ .

Измеренные размеры отверстий после растачивания и дорнования подвергались статистическим исследованиям и корреляционному анализу по методике [3], для оценки точности дорнования и количественной роли первичных погрешностей в формировании точности отверстий.

Для количественной оценки влияния унаследованных и собственных погреш-

ностей дорнования на суммарную погрешность использовались коэффициенты M и N.

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

$$M = \frac{S_{yx}^2}{S_y^2} \cdot 100 \% = (1 - r_{xy}^2) \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где  $S_{yx}^2$  – дисперсия собственной погрешности;  $S_y^2$  – дисперсия выходной погрешности.

Доля дисперсии, унаследованная от переходной погрешности, в дисперсии выходной определяется коэффициентом N:

$$N = \frac{b^2 \cdot S_x^2}{S_y^2} \cdot 100 \% = \frac{S_y^2 - S_{yx}^2}{S_y^2} \cdot 100 \% = r_{xy}^2 \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где  $b^2 S_x^2$  – доля дисперсии, унаследованной от входной  $S_x^2$ ;  $r_{xy}$  – коэффициент корреляции.

Результаты статистических исследований и корреляционного анализа точности дорнования отверстий представлены в табл. 5.

Табл. 5. Статистические характеристики экспериментальных исследований

Наименование операции	Размах выборки, мкм	$S_i$ , мкм	$\bar{X}_i$ , мм	$T_i = 6S_i$ , мкм	$\varepsilon_p$	$\varepsilon_g$	$r_{xy}$	M, %	N, %
Растачивание	50	9,0	24,963	54	–	–	–	–	–
Дорнование	30	5,3	25,017	32	1,5	1,7	0,79	37,6	62,4

Из табл. 5 видно, что традиционное дорнование не может обеспечить существенное повышение точности отверстий ( $\varepsilon_d = 1,7$ ). Это связано со значительным проявлением первичных погрешностей, особенно погрешностей, наследуемых с предыдущей операции. Это подтвержда-

ется большим значением коэффициента  $N = 62,4$  %, определяющего долю унаследованных погрешностей с предыдущей операции.

Таким образом, как и при расчётах, экспериментально подтверждено, что при традиционном дорновании на-

следуемые погрешности (60–70 %) значительно превосходят собственные погрешности процесса дорнования.

Для повышения точности дорнования необходимо снизить отрицательную роль первичных погрешностей, для чего предложены следующие технологические методы.

1. Дорнование отверстий с наложением ультразвука на инструмент (совмещённая обработка).

2. Совмещение процесса дорнования с низкоэнергетическим воздействием ионами в вакууме (комбинированная обработка).

3. Групповое дорнование.

В [5] для снижения отрицательного влияния на точность при дорновании отверстий первичных погрешностей  $\delta_m$ ,  $\delta_k$ ,  $\delta_\chi$  и  $\delta_u$  предложено ультразвуковое дорнование (УЗД).

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.

Зависимости для определения первичных погрешностей  $\delta_m$ ,  $\delta_k$ ,  $\delta_\chi$  и  $\delta_u$  при УЗД показывают [5], что рассчитанные по ним погрешности будут иметь значительно меньшие значения по сравнению с традиционным дорнованием. Это объясняется значительно меньшими значениями коэффициентов  $K_m$ ,  $K_\chi$  и  $K_k$  для УЗД по сравнению с традиционным дорнованием. Последнее связано с тем, что графическая зависимость остаточных деформаций от натягов при УЗД имеет значительно большую крутизну, т. е. большее значение коэффициента  $C$ .

Процесс дорнования осуществляется за счёт периодических ударов бойка, ввернутого в торец концентратора по инструменту, обеспечивающему микродеформации материала. Процесс происходит с огромными ускорениями, что обес-

печивает создание значительных динамических усилий.

Исследования по выявлению точностных возможностей УЗД проводились для условий эффективного использования этой схемы дорнования (с незакреплённым инструментом) по снижению статических усилий. Учитывая это, а также то, что доли остаточных деформаций в натягах при УЗД значительно больше, чем при традиционном дорновании, рекомендуется для определения максимального натяга при УЗД использовать зависимость

$$i_{\text{мфх}} = \delta_{\text{исх}} + \delta_\phi + 2R_{\text{зисх}}, \quad (7)$$

где  $\delta_{\text{исх}}$  – исходная точность обрабатываемых отверстий;  $\delta_\phi$  – предельная величина погрешностей формы;  $R_{\text{зисх}}$  – исходная шероховатость поверхностей отверстий по  $R_z$ .

Проводились исследования традиционного и УЗД двух выборок втулок из бронзы БрА9ЖЗ ГОСТ 443–79 с диаметрами отверстий 12Н9 ( $^{+0,043}$ ). Наружный диаметр втулок  $D_H = 26$  мм, длина отверстий 16 мм. Традиционное дорнование осуществлялось с натягами  $i = 0,05–0,095$  мм, а УЗД – с натягами  $i = 0,03–0,73$  мм.

Предварительные расчёты показали, что в процессе дорнования должны быть получены коэффициенты уточнения  $\varepsilon_{TD} = 1,43$  и  $\varepsilon_{УЗД} = 2,30$ . Полученные в результате экспериментов коэффициенты уточнения  $\varepsilon_{TD} = 1,50$  и  $\varepsilon_{УЗД} = 2,40$  незначительно отличаются от рассчитанных по формулам. Таким образом, УЗД обеспечило более значительное повышение точности обработки, за счёт снижения отрицательного влияния первичных погрешностей  $\delta_m$ ,  $\delta_k$ ,  $\delta_\chi$  и  $\delta_u$ .

Однако эффективность УЗД существенно снижается при увеличении натягов дорнования и размеров отверстий, приводящих к увеличению усилий деформирования, а следовательно, к выходу колебательной системы из резонанса и уменьшению амплитуды коле-

баний. Поэтому стоит задача обеспечить работу колебательной системы таким образом, чтобы с увеличением натягов изменялась и амплитуда по заданному закону, который определялся бы из условия увеличения крутизны зависимости остаточных деформаций от натягов.

Для решения этой задачи предлагается программное устройство (ПУ). Блок-схема обеспечения стабилизации и управления амплитудой смещений в очаге деформации включает в себя систему автоматической подстройки частоты (АПЧ) и автоматической подстройки амплитуды (АПА), которые должны обеспечить стабилизацию амплитуды в очаге деформации, а ПУ должно управлять амплитудой в зависимости от нагрузки и в результате этого обеспечивать величину ударного импульса такую, чтобы крутизна зависимости остаточных деформаций от натяга была максимально возможной.

Таким образом, если для серийно изготавливаемых колебательных систем вопрос стабилизации и управления амплитудой в процессе обработки с большими нагрузками будет решён, то это позволит существенно повысить эффективность УЗД даже при значительных усилиях деформирования.

Как показано выше, при традиционном дорновании большая доля погрешностей (60–70 %) исследуется от исходных. Повышение исходной точности перед дорнованием связано с дополнительными экономическими затратами. Поэтому следует применять групповое дорнование, при котором за счёт повышения исходной точности отверстий, согласно зависимости (2), должна значительно снизиться суммарная погрешность дорнования. При этом повышение исходной точности осуществляется не за счёт предварительной механической обработки, а в результате сортировки предварительно обработанных деталей на группы по размерам отверстий с групповыми допусками.

При этом детали каждой группы подвергаются обработке дорнами, исполнительные размеры которых должны

быть рассчитаны исходя из условий, что размеры отверстий каждой группы после дорнования окажутся расположенными в пределах поля допуска, заданного чертежом.

Поэтому при расчётах операции «групповое дорнование» допуск отверстия заданной чертежом детали принимается равным суммарной погрешности дорнования  $\delta_{\Sigma}^{TD}$  отверстий, входящих в одну группу.

Тогда из зависимости (4) можно определить групповую исходную точность отверстий:

$$\delta_{исх}^{GP} = \frac{\delta_{\Sigma}^{TD} - \delta_C^{GP}}{K_M + K_N}. \quad (8)$$

Можно определить число групп сортировки

$$n = \frac{\delta_{исх}}{\delta_{исх}^{GP}}. \quad (9)$$

Проводились исследования группового и традиционного дорнования для выборки втулок из стали 40Х, после улучшения НВ 260–290, с диаметром отверстия по чертежу 20Н7<sup>(+0,021)</sup> и с наружным диаметром  $D_H = 36$  мм. Для расчёта точности дорнования получили зависимость остаточных деформаций от натягов в виде

$$\Delta_{ост} = 0,58i - 0,006$$

для собственных первичных погрешностей  $\delta_C^{TD}$  оказались равной 10 мкм.

Групповая исходная точность будет

$$\delta_{исх}^{GP} = \frac{21 - 10}{0,42 + 0} = 27 \text{ мкм.}$$

При исходной точности отверстия по 9-му качеству (TD9 = 52 мкм) число групп сортировки будет

$$n = \frac{0,052}{0,027} = 1,9.$$

Принято  $n = 2$ .

Рассчитанные коэффициенты уточнения оказались  $\epsilon^{TD} = 1,6$  и  $\epsilon^{GD} = 2,6$ .

После дорнования отверстий по группам получено общее уточнение  $\epsilon^{TD} = 2,8$ , почти в 2 раза больше, чем при традиционном дорновании  $\epsilon^{TD} = 1,45$ .

Следует отметить, что после группового дорнования размеры отверстий равномерно распределились в пределах ширины поля рассеяния, определяя плоский характер вершины кривой распределения.

Таким образом, предложенные в работе мероприятия позволяют за счёт снижения отрицательного влияния первичных погрешностей дорнования существенно повысить точность обработки.

#### 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.** Прогнозирование и обеспечение точности отверстий при дорновании / Р. Н. Шадуро, П. А. Шацкий // Сб. науч. тр. – Брянск, 2006. – № 5. – С. 178–181.
3. **Колкер, Я. Д.** Математический анализ точности механической обработки деталей / Я. Д. Колкер. – Киев : Техника, 1976. – 182 с.
4. **Шадуро, Р. Н.** Способы повышения точности дорнования отверстий / Р. Н. Шадуро, П. А. Шацкий // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 282–286.
5. **Шадуро, Р. Н.** Прогнозирование и управление точности при ультразвуковом дорновании отверстий / Р. Н. Шадуро, В. Е. Понкратов, П. А. Шацкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2006. – № 3. – С. 106–112.

Белорусско-Российский университет  
РУП «Могилевтрансмаш»  
Материал поступил 10.11.2007

**R. N. Shaduro, S. N. Micheenko**  
**Accuracy increase in hole mandrelling**  
**on the basis of investigation of its**  
**technological possibilities**  
Belarusian-Russian University  
RUE «Mogilevtransmash»

The results of qualitative evaluation of the influence of initial errors on the mandrelling process accuracy have been given in the paper. Total errors of mandrelling and verification coefficient have been taken as criteria of estimation. It has been found that the accuracy of mandrelling is mostly influenced by the initial accuracy, variation of mechanical properties of the material the parts are made of, rigidity of walls and the error in placing the part during mandrelling. Specific measures enabling to lower the negative influence of initial errors on the accuracy of mandrelling are offered in the paper.