

УДК 621.787

## ТОЧНОСТЬ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА В ПОЛЫХ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРАХ, ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ДОРНОВАНИЕМ С БОЛЬШИМИ НАТЯГАМИ

В.Ф. Скворцов, И.С. Охотин, А.Ю. Арляпов

Томский политехнический университет

E-mail: TMRI@tpu.ru

Изложены результаты статистических исследований точности глубоких отверстий малого диаметра в полых цилиндрах при дорновании с большими натягами. Установлено, что с повышением степени толстостенности полых цилиндров от 3,5 до 7 увеличиваются отклонения профиля продольного сечения обрабатываемых дорнованием отверстий и происходит снижение их точности. Выявлено, что указанные отклонения вызываются возникающими в полых цилиндрах при дорновании отверстий осевыми остаточными напряжениями.

### Ключевые слова:

Дорнование отверстий, режим дорнования, точность отверстий, толстостенные цилиндры, остаточные напряжения.

### Key words:

Hole mandrelling, mandrelling parameters, hole accuracy, thick-walled cylinders, residual stresses.

Дорнование глубоких отверстий малого диаметра ( $d=1...5$  мм,  $L/d=3...100$ , где  $L$  – глубина отверстия), выполняемое твердосплавными инструментами с большими натягами (свыше  $0,03d$ ), является простым и весьма производительным методом их отделочно-упрочняющей обработки [1]. Большую группу деталей, содержащих глубокие отверстия малого диаметра, образуют полые цилиндры различной степени толстостенности, характеризующей отношением их наружного диаметра к диаметру отверстия ( $D/d$ ). Для эффективного применения дорнования при изготовлении деталей этой группы необходимо располагать данными об обеспечиваемой им точности отверстий, которые в настоящее время являются очень ограниченными.

Исследования проводили статистическим методом (методом малых выборок) на образцах в виде полых цилиндров из стали 20 (НВ 1480 МПа) с диаметром отверстий около 2 мм, наружным диаметром 7 мм ( $D/d=3,5$ ), 10 мм ( $D/d=5$ ) и 14 мм ( $D/d=7$ ), высотой (глубиной отверстия) 12 мм. Объем выборок составлял 22 образца. Отверстия получали сверлением спиральным сверлом при скорости резания около 10 м/мин и ручной подаче, которая составляла 5...10 мм/мин. Дорнование отверстий выполняли на вертикально-сверлильном станке однозубыми дорнами из твердого сплава ВК8 с применением специального приспособления [2]. Углы рабочего и обратного конусов дорнов составляли  $6^\circ$ , а ширина соединяющей их цилиндрической ленточки – 2 мм. Дорнование отверстий осуществляли за три цикла с суммарным натягом 0,09...0,22 мм. Натяги на втором и третьем циклах соответственно составляли 0,032 мм и 0,0065 мм. Скорость дорнования была около 0,5 м/мин. В качестве смазочного материала при дорновании использовали жидкость МР-7. Указанные режимы и условия дорнования были выбраны на основе предварительно проведенных экспериментов и обеспечивали точность отверстий, близкую к предельно достижимой.

Измерения диаметров отверстий и погрешностей их формы после сверления производили нутромером фирмы «Carl Zeiss Jena» (Германия), оснащенным измерительной головкой с ценой деления 0,002 мм, а после дорнования – компаратором с перффлектометром фирмы «Leitz» (Германия) с ценой деления 0,0002 мм. Измерения выполняли в двух продольных и трех поперечных сечениях отверстий (в среднем по высоте цилиндров и на расстояниях около 1 мм от их торцов). У каждого отверстия определяли минимальный, максимальный и средний диаметр. Точность обработки отверстий оценивали по параметрам распределения среднего диаметра (среднего арифметического из шести значений диаметра, измеренных в указанных сечениях), минимального и максимального диаметра, а также отклонения профиля продольного сечения и овальности. Комплексную оценку точности производили по величине суммарного поля рассеивания диаметров [3]

$$\Delta_{\Sigma} = 3s_{d_{\min}} + (\bar{d}_{\max} - \bar{d}_{\min}) + 3s_{d_{\max}}.$$

Здесь  $\bar{d}_{\min}$ ,  $\bar{d}_{\max}$  – средние значения минимальных и максимальных диаметров отверстий в выборке;  $s_{d_{\min}}$ ,  $s_{d_{\max}}$  – их средние квадратические отклонения.

Проверку гипотез равенства выборочных дисперсий и средних выполняли соответственно по критериям Фишера и Стьюдента при доверительной вероятности 0,95 [4].

Результаты исследований точности отверстий после различных обработок приведены в таблице.

Анализ результатов исследований показал, что дисперсии средних, минимальных и максимальных диаметров, отклонений профиля продольного сечения и овальности, а также средние значения перечисленных параметров отверстий после сверления в полых цилиндрах различной степени толстостенности различаются незначительно. Следовательно, по полученным данным можно объективно оценить влияние степени толстостенности

полых цилиндров на точность отверстий после дорнования.

Установлено, что с увеличением степени толстостенности полых цилиндров средние значения средних диаметров отверстий после дорнования уменьшаются. При этом дисперсии средних диаметров отверстий после дорнования различаются в целом несущественно.

Начиная со второго цикла дорнования, с повышением степени толстостенности полых цилиндров, как видно из таблицы, увеличиваются средние значения отклонений профиля продольного сечения отверстий (диаметр отверстия у торцов оказывается несколько меньше, чем в остальной части полого цилиндра). Причем, если при увеличении  $D/d$  от 3,5 до 5 средние значения отклонений профиля продольного сечения отверстий, например, после третьего цикла дорнования возрастают с 0,0010 до 0,0013 мм, то при увеличении  $D/d$  до 7 они возрастают более интенсивно и становятся равными 0,0033 мм. Дисперсии отклонений профиля продольного сечения отверстий в полых цилиндрах различной степени толстостенности различаются в целом несущественно. Влияние степени толстостенности полых цилиндров

на овальность обработанных дорнованием отверстий является незначительным.

Таким образом, повышение степени толстостенности полых цилиндров ведет к увеличению отклонений профиля продольного сечения обработанных дорнованием отверстий и, как следствие, к увеличению суммарного поля рассеивания их диаметров. Причем в полых цилиндрах с  $D/d=3,5$  и  $D/d=5$  с увеличением числа циклов дорнования средние значения отклонений профиля продольного сечения отверстий неуклонно снижаются и их точность по параметру  $\Delta_z$  возрастает. В полых цилиндрах же с  $D/d=7$  этого не происходит: средние значения отклонений профиля продольного сечения отверстий и  $\Delta_z$  с увеличением числа циклов дорнования остаются близкими к их значениям после первого цикла дорнования.

В целом при трехцикловом дорновании отверстий в полых цилиндрах с  $D/d=3,5$  и  $D/d=5$  точность отверстий по параметру  $\Delta_z$  возрастает с IT13 до IT7, в полых цилиндрах с  $D/d=7$  – с IT13 до IT8.

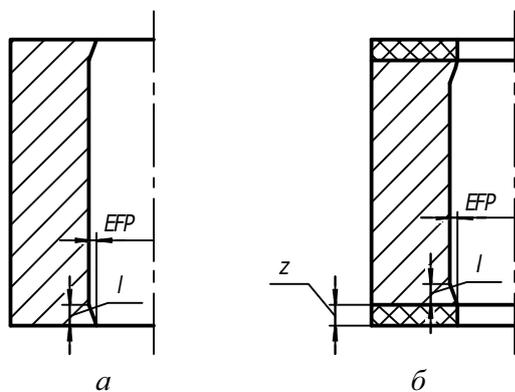
Рассмотрим причину образования отклонений профиля продольного сечения отверстий, возникающих при дорновании. Уместно предположить,

**Таблица.** Значения параметров точности отверстий в полых цилиндрах после различных обработок

Степень толстостенности полых цилиндров	Метод обработки отверстий	Диаметр отверстия, мм	Среднее значение среднего диаметра отверстий и его среднее квадратическое отклонение, мм	Среднее значение овальности отверстий и его среднее квадратическое отклонение, мм	Среднее значение отклонения профиля продольного сечения отверстий и его среднее квадратическое отклонение, мм	Суммарное поле рассеивания диаметров отверстий, мм
3,5	Сверление	1,994...2,114	<u>2,048</u> 0,01421	<u>0,0055</u> 0,00346	<u>0,0148</u> 0,00893	0,12790
	Дорнование (диаметр дорна 2,1720 мм)	2,1580...2,1688	<u>2,1643</u> 0,00109	<u>0,0012</u> 0,00054	<u>0,0025</u> 0,00074	0,01460
	Дорнование (диаметр дорна 2,2035 мм)	2,1878...2,1976	<u>2,1939</u> 0,00105	<u>0,0012</u> 0,00058	<u>0,0010</u> 0,00047	0,01159
	Дорнование (диаметр дорна 2,2100 мм)	2,1946...2,2024	<u>2,1994</u> 0,00086	<u>0,0010</u> 0,00043	<u>0,0010</u> 0,00047	0,00921
5	Сверление	1,990...2,110	<u>2,045</u> 0,01617	<u>0,0057</u> 0,00272	<u>0,0154</u> 0,00860	0,14215
	Дорнование (диаметр дорна 2,1720 мм)	2,1566...2,1692	<u>2,1627</u> 0,00070	<u>0,0013</u> 0,00073	<u>0,0032</u> 0,00072	0,01514
	Дорнование (диаметр дорна 2,2035 мм)	2,1864...2,1958	<u>2,1915</u> 0,00088	<u>0,0010</u> 0,00055	<u>0,0014</u> 0,00066	0,01113
	Дорнование (диаметр дорна 2,2100 мм)	2,1938...2,2018	<u>2,1975</u> 0,00069	<u>0,0011</u> 0,00060	<u>0,0013</u> 0,00056	0,00975
7	Сверление	1,990...2,116	<u>2,045</u> 0,01255	<u>0,0063</u> 0,00413	<u>0,0169</u> 0,01206	0,14296
	Дорнование (диаметр дорна 2,1720 мм)	2,1564...2,1686	<u>2,1611</u> 0,00100	<u>0,0009</u> 0,00048	<u>0,0027</u> 0,00067	0,01379
	Дорнование (диаметр дорна 2,2035 мм)	2,1830...2,1964	<u>2,1899</u> 0,00078	<u>0,0011</u> 0,00052	<u>0,0036</u> 0,00072	0,01603
	Дорнование (диаметр дорна 2,2100 мм)	2,1892...2,2016	<u>2,1956</u> 0,00093	<u>0,0008</u> 0,00046	<u>0,0033</u> 0,00055	0,01463

*В числителе – средние значения, в знаменателе – средние квадратические отклонения параметров точности отверстий*

что эти отклонения возникают под действием осевых остаточных напряжений, формирующихся в полых цилиндрах при дорновании отверстий. Указанные напряжения, являясь сжимающими в прилегающей к отверстию области полого цилиндра [5], постепенно затухают при приближении к его торцам и оказываются на них равными нулю [6]. Следовательно, в соответствии с обобщенным законом Гука вблизи торцов окружная остаточная деформация на поверхности отверстия и его диаметр будут меньше, чем в остальной части полого цилиндра, т. е. отверстие будет иметь соответствующее отклонение профиля продольного сечения. Так как с повышением степени толстостенности полых цилиндров осевые остаточные напряжения возрастают [5], то отклонения профиля продольного сечения обработанных дорнованием отверстий при этом также увеличиваются.



**Рисунок.** Форма отверстия в продольном сечении полого цилиндра: а) после дорнования; б) после дорнования и удаления с торцов припусков  $z$

Для проверки высказанного предположения был проведен эксперимент на полых цилиндрах из стали Х12Ф1 (НВ 2100 МПа) с диаметром отверстий около 2 мм, наружным диаметром 10 мм

( $D/d=5$ ) и высотой 30 мм, которые были подвергнуты одноцикловому дорнованию с натягом 0,2 мм. Суть эксперимента состояла в сопоставлении отклонений профиля продольного сечения обработанных дорнованием отверстий до и после удаления с их торцов припусков, равных длине искаженных участков отверстия. Вполне очевидно, что если эти отклонения порождаются осевыми остаточными напряжениями, то до и после подрезки торцов полых цилиндров они должны иметь близкие значения.

На рисунке утрировано показана форма отверстия в продольном сечении полых цилиндров до (а) и после (б) удаления с их торцов указанных припусков. Длина  $l$  искаженных участков отверстия была около 4 мм, припуск  $z$  был принят равным  $l$ . Отклонение профиля продольного сечения (EFP) отверстия после дорнования составило 0,0030 мм, а после последующего снятия припуска  $z$  – 0,0025 мм. Следовательно, можно утверждать, что образование отклонений профиля продольного сечения обработанных дорнованием отверстий в полых толстостенных цилиндрах происходит под воздействием формирующихся в них осевых остаточных напряжений.

#### Выводы

С увеличением степени толстостенности полых цилиндров от 3,5 до 7 возрастают отклонения профиля продольного сечения обрабатываемых дорнованием глубоких отверстий малого диаметра, и их точность снижается. Это происходит из-за воздействия сформированных в полых цилиндрах при дорновании отверстий осевых остаточных напряжений. При трехцикловом дорновании отверстий в полых цилиндрах со степенью толстостенности 3,5 и 5 их точность возрастает с IT13 до IT7, в полых цилиндрах со степенью толстостенности 7 – с IT13 до IT8.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 92 с.
2. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра в толстостенных заготовках с большими натягами // Современные проблемы в технологии машиностроения: Сб. трудов Всеросс. научно-практ. конф. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 164–167.
3. Кораблев П.А. Точность обработки на металлорежущих станках в приборостроении. М.: Машгиз, 1962. – 228 с.
4. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
5. Скворцов В.Ф., Охотин И.С., Арляпов А.Ю. Остаточные напряжения при дорновании отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах с большими натягами // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 2. – С. 24–27.
6. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

Поступила 08.07.2010 г.