

# ТОЛЩИНА УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПРИ ДОРНОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ В ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРАХ

*В.Ф. СКВОРЦОВ, канд. техн. наук, доцент,  
И.С. ОХОТИН, канд. техн. наук, ассистент,  
Т.С. САИСПАЕВА, магистрант,  
(ТПУ, г. Томск)*

Статья получена 14 марта 2012 года

**Скворцов В.Ф.** – 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,  
Томский политехнический университет, e-mail: TMRI@tpu.ru

Показано, что толщина упрочненного дорнованием слоя в толстостенных цилиндрах, выполненных из материала с линейным упрочнением и материала с площадкой текучести и линейным упрочнением, не зависит от степени их толстостенности и может быть с достаточной для практики точностью определена по предложенным формулам.

**Ключевые слова:** дорнование отверстий, толстостенные цилиндры, толщина упрочненного слоя.

Для обоснованного выбора режимов дорнования отверстий нужно знать влияние его основных факторов – натяга, механических свойств материала детали и ее геометрических параметров на толщину упрочненного слоя. Анализ литературы [1–3] показал, что применительно к дорнованию отверстий в деталях типа толстостенных цилиндров (степень толстостенности  $D/d \geq 3$ , где  $D$ ,  $d$  – наружный диаметр и диаметр отверстия цилиндра) зависимость толщины упрочненного слоя от указанных факторов остается не совсем ясной. Так, в работах [1, 2] утверждается, что пластические деформации и упрочнение при дорновании отверстий в цилиндрах с  $D/d \geq 3$  при любом натяге не могут достигать их наружной поверхности. В то же время нами установлено [4], что с увеличением натяга дорнования все толстостенные цилиндры (вплоть до имеющих  $D/d = 6,5$ ) испытывают сквозные пластические деформации и, следовательно, нужно ожидать их сквозного упрочнения. Таким образом, вопрос о толщине упрочненного слоя, формирующегося при дорновании отверстий в толстостенных цилиндрах, требует дальнейшего изучения.

## Расчет толщины упрочненного слоя

Для расчета толщины упрочненного слоя воспользуемся решением задачи об упругопластическом состоянии толстостенного цилиндра, нагруженного внутренним давлением и осевой силой [5]. Возможность такого подхода к анализу деформированного состояния обрабатываемых дорнованием толстостенных цилиндров обоснована в работах [1-3]. Запишем выражение радиального перемещения  $u$  на произвольном радиусе  $r$  цилиндра, справедливое как в упругой, так и в пластической области. Оно имеет вид [5]

$$u = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_T}{E} \frac{r_T^2}{r}, \quad (1)$$

где  $\sigma_T$ ,  $E$  – предел текучести и модуль упругости материала цилиндра;  $r_T$  – радиус пластической области. Выражение (1) получено в предположении о несжимаемости материала цилиндра и отсутствии его осевой деформации. Оно справедливо как для неупрочняющегося материала, так и для материала с линейным упрочнением.



Радиальное перемещение  $u_0$  на внутреннем радиусе  $r_0$  цилиндра запишется так:

$$u_0 = \frac{\sqrt{3} \sigma_T r_T^2}{2 E r_0} \tag{2}$$

Принимая, что радиальное перемещение  $u_0$  равно половине натяга дорнования  $a$ , из уравнения (2) после преобразований получаем

$$r_T = \sqrt{\frac{a r_0 E}{\sqrt{3} \sigma_T}} \tag{3}$$

Если пренебречь упругим восстановлением материала цилиндра после дорнования отверстия, то толщина упрочненного слоя  $h_y$  в цилиндрах из материала с линейным упрочнением составит

$$h_y = r_T - \left( r_0 + \frac{a}{2} \right) = \sqrt{\frac{a r_0 E}{\sqrt{3} \sigma_T}} - \left( r_0 + \frac{a}{2} \right) \tag{4}$$

Для обрабатываемых дорнованием цилиндров из материала с площадкой текучести и линейным упрочнением при интенсивности деформаций на внутреннем радиусе  $\epsilon_{i0}$ , не превышающей интенсивности деформаций  $\epsilon_{iT}$ , которая соответствует концу площадки текучести, толщина упрочненного слоя будет равна нулю. Найдем величину натяга  $a'$ , отвечающего условию

$$\epsilon_{i0} = \epsilon_{iT}$$

Интенсивность деформаций на внутреннем радиусе цилиндра запишется в виде

$$\epsilon_{i0} = 1,155 \epsilon_{i0}$$

где  $\epsilon_{i0}$  – окружная деформация на этом радиусе. Учитывая, что

$$\epsilon_{i0} = \frac{u_0}{r_0} = \frac{a'}{2r_0},$$

получаем

$$a' = \frac{2r_0 \epsilon_{iT}}{1,155}$$

Очевидно, что толщина упрочненного слоя для цилиндров из материала с площадкой текучести и линейным упрочнением может быть рассчитана по формуле (4), в которую вместо на-

тяга  $a$  нужно подставить значение  $a - a'$ . Таким образом, получим

$$h_y = \sqrt{\frac{\left( a - \frac{2r_0 \epsilon_{iT}}{1,155} \right) r_0 E}{\sqrt{3} \sigma_T}} - \left( r_0 + \frac{a}{2} \right) \tag{5}$$

Из формул (4) и (5) видно, что толщина упрочненного слоя  $h_y$  возрастает с увеличением натяга дорнования, радиуса отверстия и модуля упругости материала цилиндра и уменьшается с повышением предела текучести и увеличением протяженности площадки текучести этого материала. Степень толстостенности цилиндров на толщину упрочненного слоя влияния не оказывает. Другими словами, при дорновании отверстий данного диаметра с одинаковым натягом в цилиндрах различной степени толстостенности, изготовленных из материала с линейным упрочнением и из материала с площадкой текучести и линейным упрочнением, следует ожидать одинаковой толщины упрочненного слоя.

Найдем величину натяга дорнования  $a$ , которая вызовет сквозное упрочнение цилиндров. Принимая  $r_T = R_0$  ( $R_0$  – наружный радиус цилиндра), из уравнения (3) для цилиндров из материала с линейным упрочнением получим

$$a = \frac{\sqrt{3} \sigma_T R_0^2}{E r_0} \tag{6}$$

Очевидно, что для цилиндров из материала с площадкой текучести и линейным упрочнением

$$a = \frac{\sqrt{3} \sigma_T R_0^2}{E r_0} + \frac{2r_0 \epsilon_{iT}}{1,155} \tag{7}$$

### Экспериментальная проверка результатов расчета

Для проверки формул (4) и (5) были выполнены эксперименты по определению толщины упрочненного дорнованием слоя методом измерения микротвердости. Их проводили на толстостенных цилиндрах из сталей 45 и X12Ф1. Диаметр отверстий цилиндров перед дорнованием составлял 2,16 мм (сталь 45) и 5 мм (сталь X12Ф1). Степень толстостенности цилиндров изменялась от 3,2 до 10. Принятая технология изготовления обеспечи-

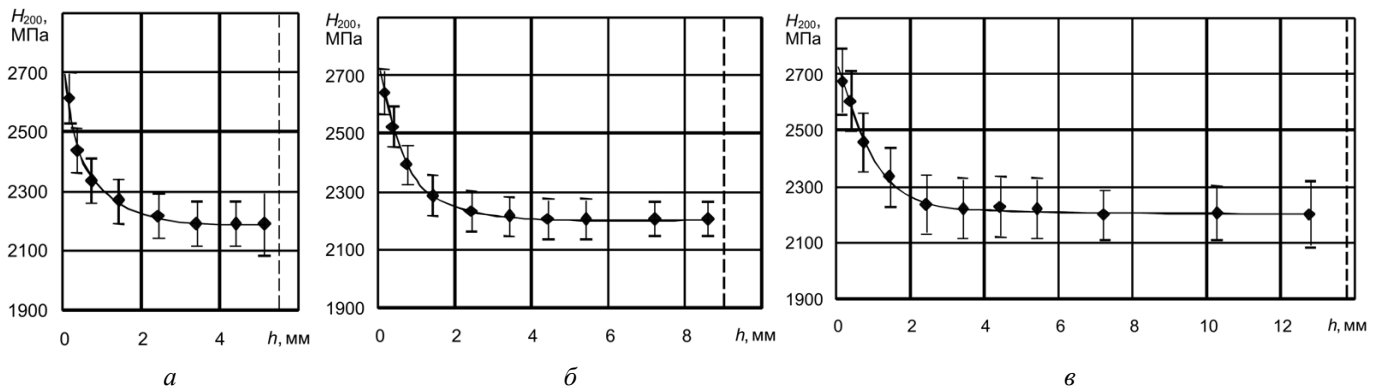


Рис. 1. Зависимости микротвердости подвергнутых дорнованию толстостенных цилиндров из стали X12Φ1 от расстояния от поверхности отверстия: диаметр отверстий  $d = 5$  мм, натяг  $a = 0,06$  мм, степень толстостенности  $D/d = 3,2$  (а);  $D/d = 4,6$  (б);  $D/d = 6,5$  (в) (пунктирными линиями здесь и на рис. 2 показана наружная поверхность цилиндров)

вала высокую точность отверстий цилиндров ( $IT 7$ ) и малую шероховатость их поверхностей ( $Ra \leq 0,63$  мкм). Перед дорнованием отверстий цилиндры отжигали в вакууме при температуре  $880^\circ\text{C}$  в течение одного часа. Дорнование отверстий выполняли с помощью специального приспособления [6] на вертикально-сверлильном станке однозубыми дорнами из твердого сплава BK8 при скорости  $0,008$  м/с по схеме сжатия. Углы рабочего и обратного конусов дорнов составляли  $6^\circ$ . В качестве смазочных материалов при дорновании применяли жидкость МР-7 (сталь 45) и смесь этой жидкости с дисульфидом молибдена (сталь X12Φ1). Натяги дорнования  $a$  были приняты равными  $0,06$  мм (сталь X12Φ1) и  $0,10$  мм (сталь 45). Обработку производили за один цикл. Измерение микротвердости выполняли на косых и прямых шлифах с помощью прибора ПМТ-3 при нагрузке на пирамиду  $1,96$  Н.

Результаты исследования упрочнения обработанных дорнованием цилиндров в виде графиков зависимостей микротвердости от расстояния от поверхности отверстия представлены на рис. 1 и 2. Каждая точка на графиках представляет собой среднее арифметическое значение микротвердости, полученное в результате не менее 10 измерений. Около средних значений микротвердости показаны доверительные интервалы, соответствующие вероятности 95 %.

Как видно из рис. 1 и 2, толщина упрочненного слоя  $h_y$  в толстостенных цилиндрах оказывается в десятки

раз больше величины натяга дорнования  $a$ . При этом толщина упрочненного слоя (рис. 1) в соответствии с формулами (4) и (5) практически не зависит от степени толстостенности цилиндров. При относительно небольшой степени толстостенности ( $D/d = 3,2$ ) цилиндров из стали 45, когда значение использованного при дорновании натяга ( $a = 0,10$  мм) оказывается больше, чем определенное по формуле (6), их упрочнение становится сквозным (рис. 2, а).

В таблице дано сопоставление толщин упрочненных дорнованием слоев  $h_y$ , определенных расчетом и экспериментально на основе зависимостей, приведенных на рис. 1 и 2. Расчет значений  $h_y$  для цилиндров из стали X12Φ1 выполняли по формуле (4), а для цилиндров из стали 45 – по формуле (5). Значение пределов текучести сталей и протяженности площадки текучести  $\epsilon_{IT}$

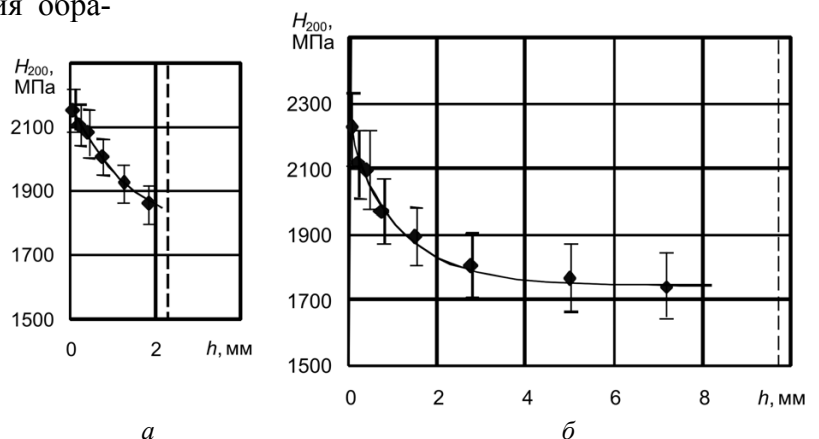


Рис. 2. Зависимости микротвердости подвергнутых дорнованию толстостенных цилиндров из стали 45 от расстояния от поверхности отверстия: диаметр отверстий  $d = 2,16$  мм, натяг  $a = 0,1$  мм, степень толстостенности  $D/d = 3,2$  (а);  $D/d = 10$  (б)

**Расчетные и экспериментальные значения толщин  
упрочненных дорнованием слоев в толстостенных цилиндрах**

Материал цилиндра	Диаметр отверстия $d$ , мм	Степень толстостенности $D/d$	Натяг дорнования $a$ , мм	Толщина упрочненного слоя $h_y$ , мм	
				расчет	эксперимент
Сталь X12Ф1 (НВ 2100 МПа, $\sigma_{0,2} = 450$ МПа)	5,0	3,2	0,06	3,7	3,5
	5,0	4,6	0,06	3,7	3,5
	5,0	6,5	0,06	3,7	3,5
Сталь 45 (НВ 1700 МПа, $\sigma_{0,2} = 350$ МПа, $\varepsilon_{ит} = 0,012$ )	2,16	10	0,10	4,2	4,6

для стали 45 (см. таблицу) были приняты по данным [7]. Модуль упругости  $E$  сталей был взят равным  $2 \cdot 10^5$  МПа. Из таблицы видно, что величины  $h_y$ , определенные расчетом и экспериментально, различаются не более чем на 10 %.

Таким образом, толщина упрочненного дорнованием слоя в толстостенных цилиндрах, изготовленных из материала с линейным упрочнением и материала с площадкой текучести и линейным упрочнением, не зависит от степени их толстостенности и с достаточной для практики точностью может быть рассчитана по формулам (4) и (5). Если натяг дорнования достигает значений, определенных по формулам (6) и (7), то упрочнение цилиндров становится сквозным.

#### Список литературы

1. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.

2. Розенберг О.А., Цеханов Ю.А., Шейкин С.Е. Технологическая механика деформирующего протягивания. – Воронеж: ВГТА, 2001. – 203 с.

3. Проскураков Ю.Г. Дорнование отверстий. – Свердловск: Машгиз, 1961. – 192 с.

4. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. О влиянии геометрических параметров заготовок на процесс дорнования // Известия вузов. Машиностроение. – 2008. – № 9. – С. 55–59.

5. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.

6. 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 Всерос. научно-практ. конф. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 164–167.

7. Охотин И.С. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах с большими натягами: дис. ... канд. техн. наук. – Томск: Томский политехнический университет, 2010. – 171 с.

#### Thickness of the hardened layer of the holes mandrelled in thick-walled cylinders

V.F. Skvortsov, I.S. Okhotin, T.S. Saispayeva

It is shown that the thickness of the mandrelling hardened layer of the thick-walled cylinders made of linear hardened material or linear hardened material without yield plateau does not depend on wall thickness ratio and can be accurately calculated by the given equations.

**Key words:** hole mandrelling, thick-walled cylinders, hardened layer thickness.