

# Задание № 1

Исследуется процесс деформирующего протягивания (прошивания, калибрования) отверстия детали типа втулки.

“Справочник технолога-машиностроителя. Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. Т. 2. М.: Машиностроение, 1985 г.” Гл.6, стр. 397 . . . 410 (Калибрование отверстий).

## КАЛИБРОВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ

Сущность процесса и схемы обработки. Калибрование (деформирующее протягивание, допирование) – чистовая операция обработки отверстий деталей машин пластическим деформированием. Эту операцию выполняют перемещением с натягом деформирующего инструмента (оправки с деформирующими элементами или шарика). При  $l/d \leq 7$ , где  $l$  – длина отверстия и  $d$  – его диаметр, детали обрабатывают методом прошивания (рис. 16, а и б), а при  $l/d > 7$  – методом протягивания (рис. 16, в – д). Глухие отверстия обрабатывают при возвратно-поступательном движении оправки (рис. 16, д). Различают обработку со сжатием (рис. 16, в) и с растяжением (рис. 16, г). Наиболее часто обработку ведут со сжатием. При обработке с растяжением тонкостенных цилиндров при  $l/d > 4$  получают меньшие отклонения от прямолинейности поверхностей детали, чем при обработке их со сжатием. Хорошие результаты в этом случае обеспечивает обработка с осевым заневоливанием (предварительным растяжением) детали (рис. 17). Так, при обработке цилиндра диаметром 70 мм, длиной 5000 мм и с толщиной стенки 2,5 мм

отклонение от прямолинейности не превышает 0,4 мм/м. Иногда применяют обработку с радиальным заневоливанием (деталь с зазором помещают в жесткий корпус, рис. 18).

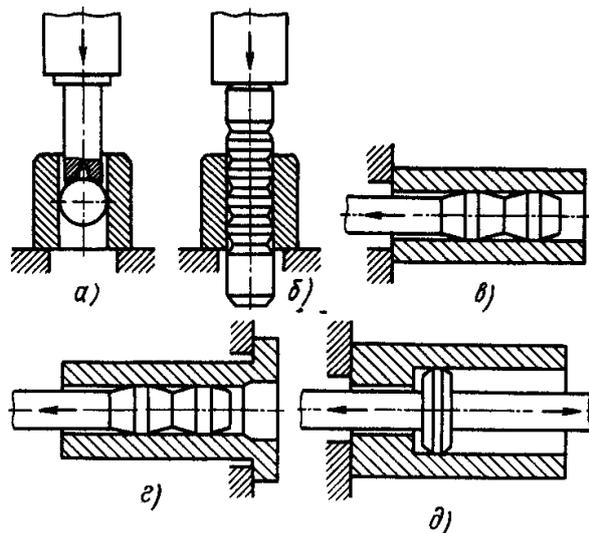


Рис. 16. Схемы обработки отверстий: а и б – прошиванием с помощью шарика и оправки; в – со сжатием детали; г – с растяжением детали; д – при возвратно-поступательном ходе оправки

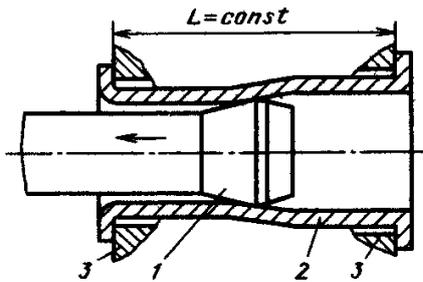


Рис. 17. Обработка с осевым заневоливанием детали: 1 — инструмент; 2 — деталь; 3 — опоры

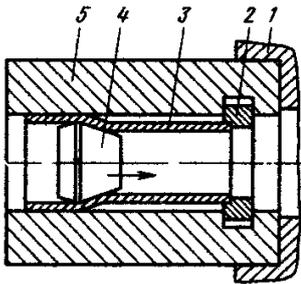


Рис. 18. Обработка с размещением детали в жестком корпусе: 1 — опорная плита станка; 2 — раздвижная опора; 3 — деталь; 4 — инструмент; 5 — жесткий корпус

Основным технологическим параметром процесса является натяг  $i = d_{ин} - d_0$ , где  $d_{ин}$  — диаметр деформирующего инструмента;  $d_0$  — диаметр отверстия до обработки (средняя арифметическая величина с учетом отклонений формы в поперечном сечении).

Обработку проводят с малым (до 0,5 мм) или с большим натягом (до 20% от диаметра отверстия). При обработке с малыми натягами уменьшаются отклонение формы в поперечном сечении (отклонение от круглости) и разброс значений диаметров отверстий в партии деталей (повышается точность размера) на 30–35%, уменьшаются также параметры шероховатости поверхности. Метод применяют при обработке толстостенных деталей (отношение толщины стенки к радиусу отверстия  $h/r > 0,5$ ) и деталей, у которых нежелательно существенное изменение формы и размеров после обработки. С малыми натягами обрабатывают детали и после термической обработки.

Тонкостенные цилиндры и втулки ( $h/r \leq 0,2$ ) обрабатывают как с малыми, так и большими натягами. Зона пластической деформации при этом охватывает всю деталь. В результате обработки увеличивается диаметр отверстия на величину припуска  $2z_1 = d_{ин} - d_0$  (рис. 19), изменяется размер наружной поверхности и уменьшаются длина детали и толщина стенки (объем детали до и после обработки остается неизменным). Недостатком процесса является снижение точности по длине, увеличе-

ние отклонения от прямолинейности и отклонений, определяющих положение торцов. Точность размера отверстия при этом можно повысить на один-два 'квалитета и получить поверхность высокого качества. Таким методом можно обрабатывать цилиндрические и фасонные отверстия.

Суммарный натяг лимитируется пластичностью материала детали. Деталь из хрупких материалов обрабатывают с малыми натягами, так как при больших натягах может произойти ее разрушение.

Инструментом для обработки при калибровании служат оправки или шарики. Обработка шариками не обеспечивает оптимальных условий деформирования — элементы имеют малую размерную стойкость. Однако шарики применяют в промышленности ввиду простоты процесса обработки и возможности его автоматизации.

В зависимости от диаметра обрабатываемого отверстия и выполняемой операции при-

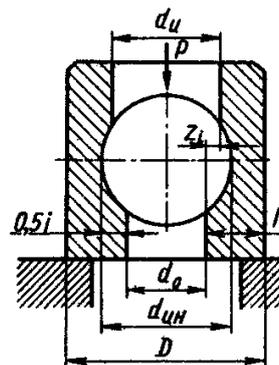


Рис. 19. Калибрование отверстия шариком

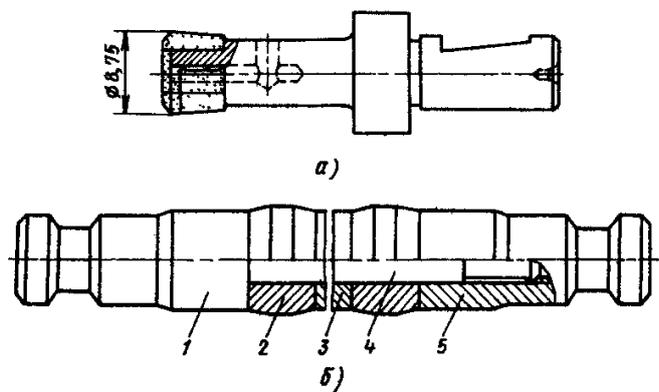


Рис. 20. Калибрующая оправка: а — одноэлементная для глухих отверстий; б — сборная для тонкостенных цилиндров; 1 — передний хвостовик с направляющей; 2 — деформирующий элемент; 3 — промежуточная (дистанционная) втулка; 4 — стержень; 5 — задний хвостовик с направляющей

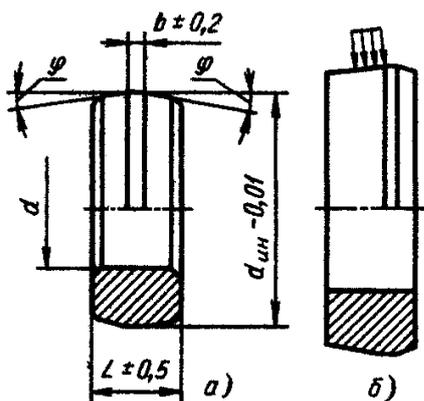


Рис. 21. Деформирующий элемент сборной оправки: а – симметричный; б – симметрично-нагруженный

меняют оправки с одним (рис. 20, а) или несколькими (рис. 20, б) деформирующими элементами, цельные или сборные. Оправки, предназначенные для обработки сквозных отверстий, выполняют с передним и задним хвостовиками для крепления инструмента в патроне или подвижной каретке станка. Оправки могут иметь направляющие части, обеспечивающие взаимную ориентацию детали и инструмента.

Материал деформирующих элементов (твердый сплав ВК15, ВК15М) обеспечивает высокую износостойкость инструмента и высокую изгибную прочность. При малых нагрузках на инструмент можно применять сплав ВК8. Стержни, хвостовики и дистанционные втулки сборных оправок изготавливают из углеродистых сталей, закаленных до твердости HRC 40–45. В собранном виде радиальное биение деформирующих элементов относительно направляющих не должно превышать 0,02–0,05 мм. Это требование выполняют за счет высокой точности изготовления деталей оправки. Особое внимание уделяют стержню (радиальное биение его не должно быть более 0,01–0,02 мм), дистанционным втулкам и деформирующим элементам (торцовое и радиальное биение их относительно базового отверстия не должно быть более 0,005–0,01 мм). Рабочая форма деформирующих элементов (рис. 21, а) обычно представляет собой два усеченных конуса с углами  $\varphi = 3 \div 5^\circ$  (наиболее часто  $4^\circ$ ) и цилиндрическую поверхность (калибрующую ленточку), соединяющую большие основания конусов. Ширина ленточки  $b = 0,35d^{0,6}$ . При обработке отверстий диаметром 15–150 мм ширину  $b$  (мм) выбирают в зависимости от материала детали и толщины ее стенки:

Материал детали

Деталь  
тонко-стенная      толсто-стенная

Конструкционные и легированные стали (10; 20; 35; 45; 20X; 40X и др.) . . .	1,5–3,0	0,3–0,5
Легированные стали (30ХГСА; 40ХНМА; 38ХМЮА; 12Х18Н10Т и др.) . . . . .	0,6–1,0	0,2–0,3
Цветные сплавы (АК6, Д16Т, В93, В95 и др.) . . .	0,5–1,0	0,1–0,2

Деформирующий элемент часто выполняют симметричным – можно работать с подачами вперед и назад или повернуть элемент при его износе. Элемент с более длинным рабочим и более коротким обратным конусом (рис. 21, б) обладает наивысшей несущей способностью.

При работе с большими натягами расчет размеров деформирующего элемента проводится следующим образом.

Из условия прочности толщина стенки деформирующего элемента

$$t_k = \frac{0,329Q^{0,735} K_L^{0,71} 0,938^l}{f^{0,43} [\sigma_{из}]^{0,735} d_{ин}^{0,36}}, \quad (1)$$

где  $Q$  – сила протягивания, Н;  $K_L$  – коэффициент высоты деформирующего элемента (отношение фактической высоты  $L_{фак}$  к оптимальной  $L_{опт}$ ); значения коэффициента приведены в табл. 11;  $l$  – ширина контакта деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью, мм, зависящая от диаметра деформирующего элемента, натяга и толщины стенки обрабатываемой детали (табл. 12);  $f$  – коэффициент трения между элементом и обрабатываемой поверхностью; в зависимости от обрабатываемого материала и технологической смазки  $f = 0,05 \div 0,14$ ;  $d_{ин}$  – диаметр деформирующего элемента, мм;  $[\sigma_{из}]$  – допустимое напряжение твердого сплава при изгибе, МПа;

$$[\sigma_{из}] = \sigma_{в из} \frac{K_{пс}}{K_{зп}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{в из}$  – предел прочности при изгибе для твердого сплава;

$$\sigma_{в из} = 4,62d_{ин}^{-0,36} t_k^{-0,45} \sigma_{в из ст}; \quad (3)$$

здесь  $\sigma_{в из ст}$  – предел прочности твердого сплава при изгибе, оговоренный ГОСТом (для ВК15  $\sigma_{в из ст} = 1800$  МПа);  $K_{пс}$  – коэффициент посадки деформирующего элемента на стержень протяжки;  $K_{зп}$  – коэффициент запаса прочности (см. табл. 11).

11. Значения коэффициентов  $K_L$  и  $K_{ЭП}$ 

Коэффициент	$d_{ин}$ , мм	Обрабатывается отверстие		
		в горячекатаной трубе	в холоднотянутой трубе	предварительно обработанное
$K_L$	< 80	$\frac{1,25 - 1,5 *1}{1,2 - 1,3}$	$\frac{1,1 - 1,3 *1}{1,1 - 1,2}$	$\frac{1,25 - 1,4 *2}{1,1 - 1,25}$ (1,0 - 1,1) *3
		$\frac{1,1 - 1,3}{1,1 - 1,2}$	$\frac{1,1 - 1,2}{1,0 - 1,2}$	$\frac{1,1 - 1,3}{1,0 - 1,2}$ (1,0)
	80 - 120	$\frac{1,0 - 1,2}{1,0 - 1,1}$	$\frac{1,0}{1,0}$	$\frac{1,0 - 1,2}{1,0 - 1,1}$ (1,0)
	> 120			
$K_{ЭП}$	—	$\frac{2 - 3,5}{2 - 3}$	$\frac{1,8 - 2,2}{1,8 - 2,0}$	$\frac{2 - 2,5}{1,8 - 2,2}$ (1,8 - 2,0)

\*1 В числителе дроби даны значения  $K_L$  и  $K_{ЭП}$  для обработки заготовок с предварительно необработанными отверстиями, в знаменателе — для травленных отверстий.

\*2 В числителе дроби даны значения  $K_L$  и  $K_{ЭП}$  для заготовок с колебанием толщины стенки по окружности  $\frac{t_{0 \max} - t_{0 \min}}{t_{0 \min}} > 0,3$ ; в знаменателе — для  $\frac{t_{0 \max} - t_{0 \min}}{t_{0 \min}} < 0,2$ .

\*3 Значения коэффициентов  $K_L$  и  $K_{ЭП}$ , приведенные в скобках, используют при разностенности заготовок (после предварительной обработки) до 0,3 мм.

## 12. Ширина контакта / деформирующего элемента с обрабатываемой заготовкой

Размеры, мм

$d_{ин}$	$t_0$	Натяг $i$							$d_{ин}$	$t_0$	Натяг $i$						
		0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0			0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
16	2,5	0,7	1,4	5,0	8,8	13,0	—	—	45	2,5	0,3	0,5	3,1	6,3	10,9	14,4	18,6
	5,0	1,4	1,8	4,5	8,6	—	—	5,0		0,5	0,8	2,1	5,0	9,2	12,2	16,6	
	7,5	1,4	2,4	5,2	—	—	—	10,0		0,8	1,7	2,8	4,6	7,2	10,8	13,3	
	10,0	2,3	3,2	6,0	—	—	—	15,0		1,5	2,3	3,9	5,5	7,5	10,4	11,1	
20	2,5	0,6	1,2	5,0	8,1	12,3	—	—	55	2,5	0,3	0,5	1,6	5,4	10,0	13,6	18,2
	5,0	1,1	1,6	4,1	7,9	11,0	—	—		5,0	0,4	0,7	1,7	4,3	8,8	11,4	15,8
	10,0	1,7	2,8	5,4	—	—	—	10,0		0,7	1,1	2,2	3,6	5,9	9,2	12,1	
	15,0	2,9	4,3	—	—	—	—	15,0		1,2	1,9	3,2	4,5	6,3	9,0	10,0	
25	2,5	0,5	0,8	4,8	7,4	12,1	15,8	19,7	65	2,5	0,3	0,5	1,4	4,7	8,9	13,0	18,0
	5,0	0,7	1,4	3,6	7,1	10,7	14,2	17,5		5,0	0,3	0,6	1,4	3,5	7,3	10,3	14,9
	10,0	1,4	2,4	4,7	6,0	10,5	13,7	16,0		10,0	0,6	0,9	1,8	2,9	4,8	7,8	10,8
	15,0	2,4	3,8	6,1	—	—	—	—		15,0	1,0	1,6	2,7	4,1	5,3	7,7	9,2
35	2,5	0,4	0,6	4,3	6,9	11,9	15,0	19,1	20,0	1,7	2,5	4,0	5,1	6,5	8,7	10,1	
	5,0	0,6	1,1	2,7	5,6	10,1	13,2	16,6		25,0	2,2	3,5	5,6	6,9	8,2	10,5	12,7
	10,0	1,1	1,8	3,6	5,0	8,8	12,4	14,1									
	15,0	1,9	2,9	4,9	6,7	8,8	11,7	12,3									
20,0	2,8	4,1	6,2	—	—	—	—	—									
	25,0	3,4	4,5	6,7	—	—	—	—									

Продолжение табл. 12

$d_{ин}$	$t_0$	Натяг $i$							$d_{ин}$	$t_0$	Натяг $i$						
		0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0			0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
80	2,5	0,3	0,5	0,8	3,5	6,2	12,3	17,7	130	2,5	0,3	0,4	0,4	1,4	3,2	10,6	17,3
	5,0	0,3	0,5	1,1	2,5	5,0	9,2	13,5		5,0	0,3	0,4	0,7	0,7	1,8	6,6	12,5
	10,0	0,5	0,8	1,4	2,3	3,7	6,2	10,0		10,0	0,5	0,6	0,9	1,3	2,2	4,0	7,2
	15,0	0,9	1,5	2,2	3,5	4,3	6,3	8,7		15,0	0,9	1,2	1,7	2,2	2,9	4,4	6,5
	20,0	1,5	2,2	3,5	4,4	5,5	7,3	9,7		20,0	1,1	2,1	2,8	3,8	4,5	5,6	6,8
	25,0	2,0	3,4	4,9	6,3	7,3	9,1	11,6		25,0	1,9	3,1	4,0	5,3	6,5	6,9	9,1
100	2,5	0,3	0,4	0,5	2,4	4,6	11,6	17,5	150	2,5	0,2	0,3	0,3	0,9	2,2	10,4	17,3
	5,0	0,3	0,5	0,9	1,5	3,3	7,9	12,5		5,0	0,2	0,3	0,5	0,8	1,7	6,0	12,3
	10,0	0,5	0,7	1,2	1,8	2,9	4,9	9,4		10,0	0,4	0,5	0,7	1,0	1,7	3,4	7,0
	15,0	0,9	1,2	1,9	1,9	3,5	5,1	7,2		15,0	0,7	1,1	1,3	1,8	2,5	3,9	6,3
	20,0	1,4	2,1	3,3	4,0	4,8	6,2	7,9		20,0	1,0	1,8	2,5	3,3	4,1	5,2	6,5
	25,0	1,9	3,1	4,5	5,6	6,7	7,8	10,1		25,0	1,4	2,9	3,7	5,5	5,9	6,3	8,5

Примечание. В таблице  $t_0$  — толщина стенки заготовки.

В формуле (3)

$$K_{пс} = 1,1 d_k^{0,33} t_k^{-0,42} e^{\frac{310\Delta^{1,1}}{d_k}} K_{\phi}, \quad (4)$$

где  $K_{\phi}$  — коэффициент формы деформирующего элемента;  $K_{\phi} = 1$  при цилиндрическом отверстии в деформирующем элементе и  $K_{\phi} = 1,2$  при отверстии с конусами и посадке с натягом.  $K_{пс}$  не может быть меньше единицы, поэтому, если по формуле (4)  $K_{пс} < 1$ , для дальнейших расчетов  $K_{пс} = 1$ ;  $\Delta$  — величина зазора или натяга, мм, при посадке деформирующего элемента на стержень протяжки. В случае зазора показатель степени у величины  $e$  берется со знаком минус, в случае натяга — со знаком плюс. Опыт показывает, что применять натяги более  $0,001d_k$  не следует, так как это может вызвать разрыв деформирующего элемента при его посадке на стержень протяжки ( $d_k$  — диаметр посадочного отверстия;  $e$  — основание натурального логарифма).

При определении толщины стенки  $t_k$  по уравнениям (1), (2) и (3) принимают  $K_{пс} = 1$ .

Если по формуле (3)  $\sigma_{в.из} < 800$  МПа или  $\sigma_{в.из} > 2000$  МПа, то в расчетах принимают  $\sigma_{в.из} = 800$  или  $2000$  МПа.

После определения толщины стенки  $t_k$  деформирующего элемента рассчитывают его оптимальную высоту:

$$L_{опт} = K_L \left[ \frac{l}{2} + \sqrt{\frac{l^2}{4} + \frac{8vR_k W}{\pi(R_k^2 - r_k^2)}} \right], \quad (5)$$

где  $R_k$  — наружный радиус деформирующего элемента, мм;  $r_k$  — внутренний радиус деформирующего элемента, мм;  $v$  — отношение предела прочности твердого сплава при изгибе к пределу прочности при сжатии; для сплава ВК15  $v = 0,516$ ;  $W$  — момент сопротивления изгибу деформирующего элемента в сечении, перпендикулярном его оси, мм<sup>3</sup>;

$$W = \pi \frac{9(R_k^4 - r_k^4)(R_k^2 - r_k^2) - 8(R_k^3 - r_k^3)^2}{12(R_k^3 - r_k^3) - 18(R_k^2 - r_k^2)r_k}. \quad (6)$$

После того как будет найдено значение  $L_{опт}$ , определяют минимальную (по конструктивным соображениям) высоту деформирующего элемента:

$$L_{кд} = \frac{i}{2 \operatorname{tg} \varphi} + b + 2(b_{\text{фас}} + c), \quad (7)$$

где  $b$  — ширина цилиндрической ленточки, мм;  $\varphi$  — угол рабочего конуса;  $b_{\text{фас}}$  — ширина фаски, мм;  $c$  — длина нерабочего участка рабочего конуса, равная длине обратного конуса.

Сравнивают значения  $L_{опт}$  и  $L_{кд}$  и выбирают большее из них. Если большим окажется  $L_{кд}$ , то по формуле (5) определяют действительное значение  $K_L$  и по уравнению (1) корректируют значение  $t_k$ .

В тех случаях, когда расчет деформирующего элемента показывает, что ввиду большой рабочей нагрузки его запас прочности оказывается недостаточным, следует использовать элементы, показанные на рис. 22, и осуществ-

Исходные данные:

Исследуется процесс деформирующего протягивания (прошивания, калибрования) отверстия детали типа втулки; протягивание отверстия осуществляется инструментом с одним деформирующим элементом (рис.21а).

Параметры детали: материал детали – сталь 45,  $d_0 = 39,5$  мм (диаметр отверстия),  $D = 60$  мм (наружный диаметр), длина детали 60 мм.

Параметры деформирующего элемента:  $d_{ин} = 40$  мм (диаметр деформирующего элемента), материал – сплав ВК15.

Параметры процесса протягивания: натяг на деформирующий элемент  $i = 0,25$  мм.

Задача вычислительного эксперимента:

Допустим по условиям процесса расчетная толщина деформирующего элемента  $t_k$  может изменяться в пределах  $t_k = 6 \dots 10$  мм. Найти с помощью вычислительного эксперимента оптимальную (минимальную) длину деформирующего элемента

$L_{опт(min)}$  - ?

Для расчета  $L_{опт}$  использовать формулы (5) и (6); расчет провести с шагом  $\Delta t_k = 0,2$  мм.

“Справочник технолога-машиностроителя. Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. Т. 1,2. М.: Машиностроение, 1985 г.”