

Прочность элементов оборудования

Азиханов С.С.



Основные понятия и определения

Прочность – способность тела сопротивляться внешним нагрузкам.

Жесткость – способность тела сопротивляться изменению своих размеров и формы под воздействием внешних нагрузок.

Устойчивость – способность тела под нагрузкой сохранять первоначальную форму устойчивого равновесия.

Выносливость – способность материала сопротивляться переменным силовым воздействиям длительное время.

Показателем надежности является коэффициент запаса n :

$$n = \frac{P_{кр}}{P_{max}}$$

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.1.Критерии прочности и работоспособности деталей

Критерий прочности при статических нагрузках

$\sigma \leq [\sigma]$ по допускаемым напряжениям

$P \leq [P]$ по предельным нагрузкам

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.1.Критерии прочности и работоспособности деталей

Критерий выносливости деталей, подверженных воздействию циклических нагрузок

$$N_p \leq [N] \quad \text{по числу циклов нагружения}$$

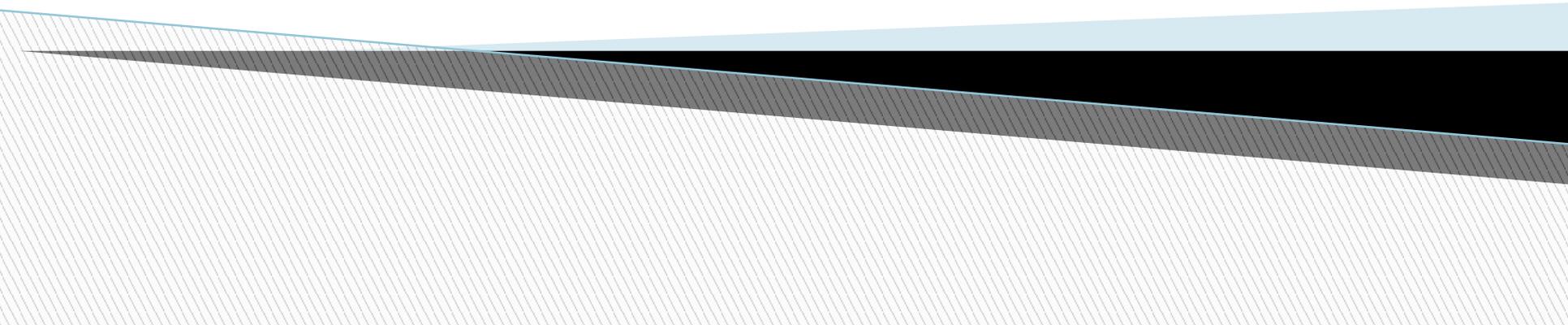
$$\sigma_{\text{ц}} \leq \sigma_{\text{ПВД}} \quad \text{по пределу выносливости}$$

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.1.Критерии прочности и работоспособности деталей

Критерий устойчивости тонкостенной оболочки

$$\frac{P}{[P]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 \leq 1$$



Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.1.Критерии прочности и работоспособности деталей

Критерий жесткости

$\Delta_p \leq [\Delta]$ по линейным деформациям

$\alpha_p \leq [\alpha]$ по угловым деформациям

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.1.Критерии прочности и работоспособности деталей

Критерий виброустойчивости элементов, подверженных механическим колебаниям

$$\beta_n \geq \frac{\omega}{\omega_0} > \beta_v$$

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.1. Критерии прочности и работоспособности деталей

На основе условий прочности и жесткости для конкретной расчетной схемы могут решаться три типа задач (при любом виде нагружения).

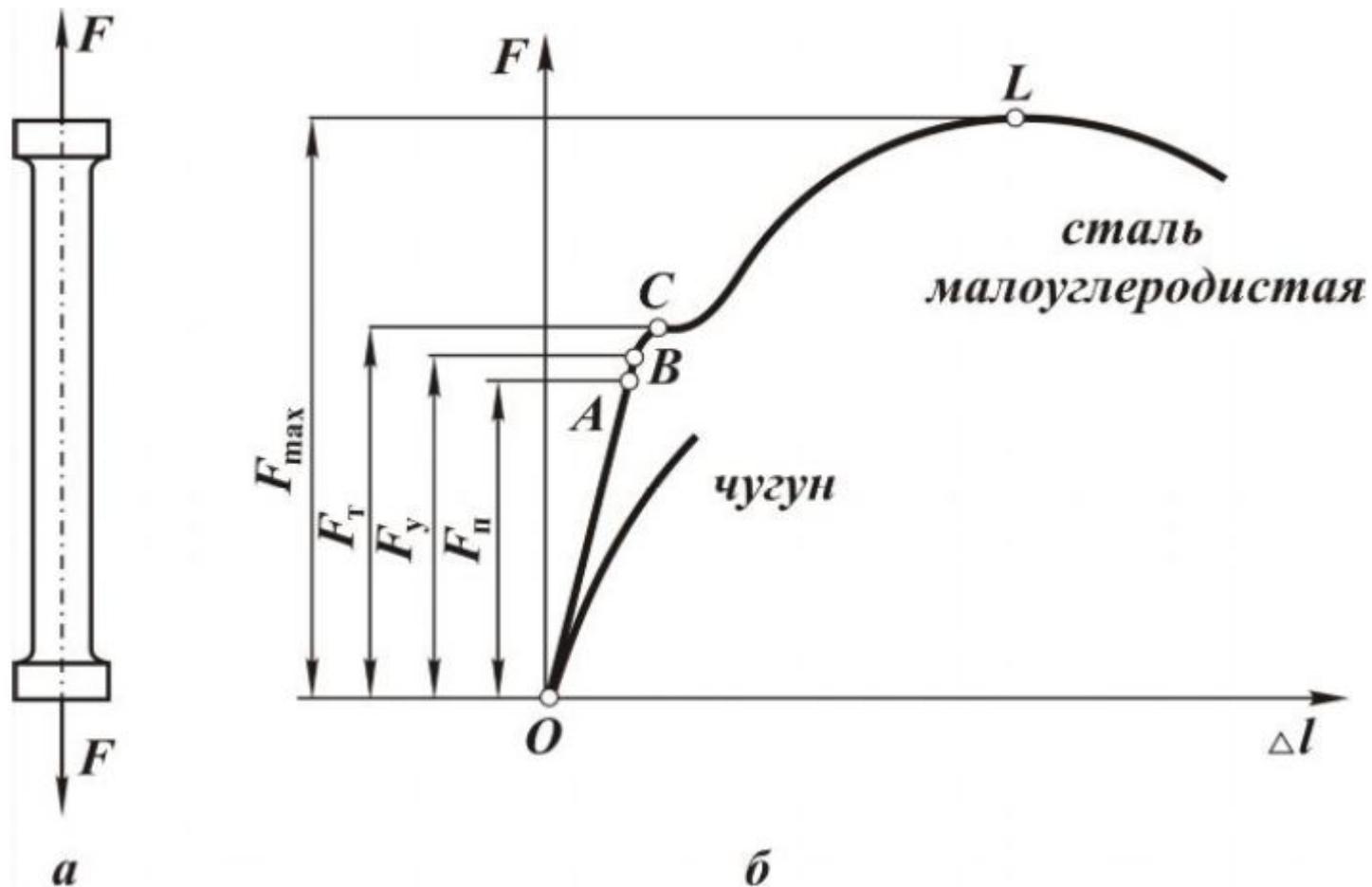
1. *Проверочный расчет.* Цель расчета – проверка условий прочности и жесткости при следующих известных параметрах: внешние нагрузки, размеры конструкции и ее элементов, материал элементов конструкции $[\sigma]$, $[\varepsilon]$.

2. *Проектный расчет.* Цель расчета – определение размеров элементов конструкции, если известны внешние нагрузки и материал элементов конструкции. При данном расчете возможен и подбор материала для заданных размеров деталей.

3. *Расчет допустимых нагрузок.* Цель расчета – определение максимально допустимых внешних нагрузок для заданных размеров элементов конструкции и выбранном материале.

Тема №6 Прочность элементов оборудования

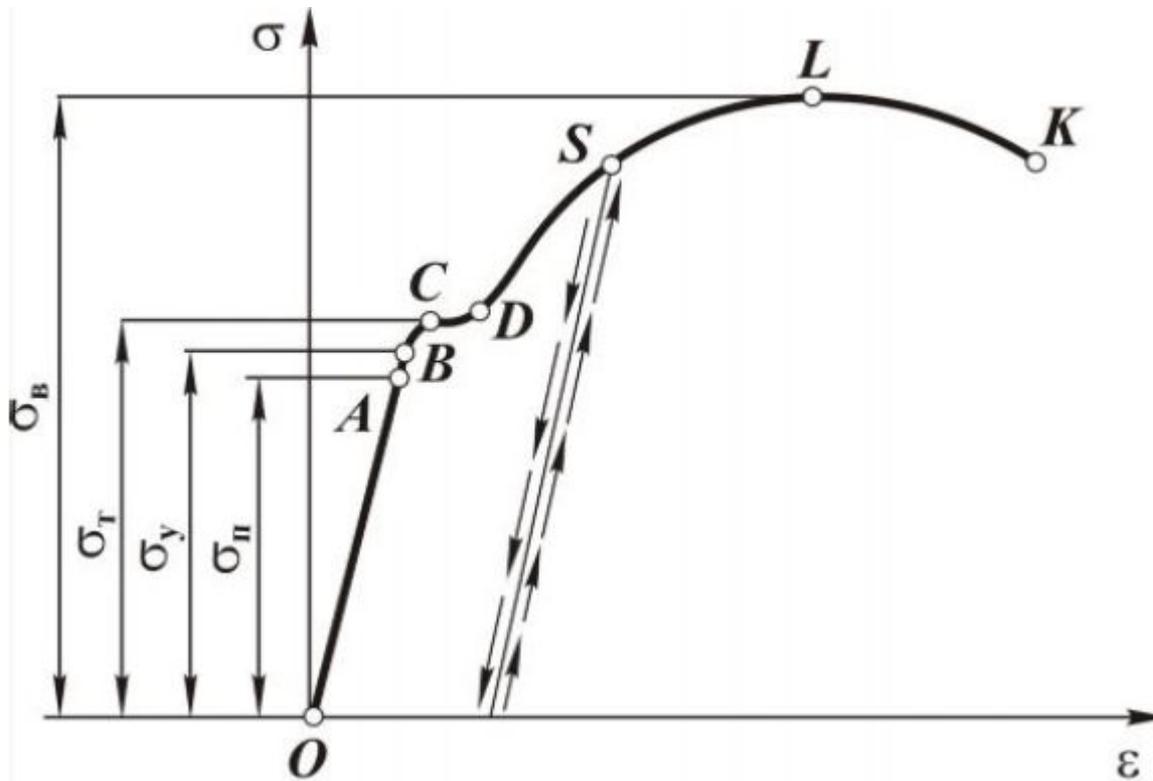
6.1. Критерии прочности и работоспособности деталей



деформация $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$, напряжение $\sigma = \frac{F}{A_0}$;

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.1.Критерии прочности и работоспособности деталей



$$\sigma_n = \frac{F_n}{A_M}$$

$$\sigma_y = \frac{P_y}{A_0}$$

$$\sigma_T = \frac{P_T}{A_0}$$

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{A_0}$$

$$[\sigma] = \frac{\sigma_B}{n_B}$$

Ползучесть материала -способность медленно и непрерывно пластически деформироваться при постоянной нагрузке.

Ползучесть зависит от:

- ▣ температуры эксплуатации (300-400 °С)
- ▣ нагрузки
- ▣ химического состава (Cr, W, V, Ni, Mn)
- ▣ термической обработки

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.1.Критерии прочности и работоспособности деталей

Важно!

Предел ползучести с ростом t снижается быстрее, чем предел текучести, поэтому необходимо учитывать не только предел текучести, но и предел ползучести:

- для углеродистой стали $t > 380^\circ\text{C}$
- для легированных сталей $t > 420^\circ\text{C}$
- для высоколегированных хромоникелевых $t > 525^\circ\text{C}$

Релаксация – самопроизвольное снижение напряжений при высокой температуре в образцах или деталях при их неизменной деформации (болты, шпильки, пружины предохранительных клапанов, работающих при высокой температуре).

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_y + \varepsilon_n$$

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.2. Постановка задачи прочностного расчета, разработка расчетной модели

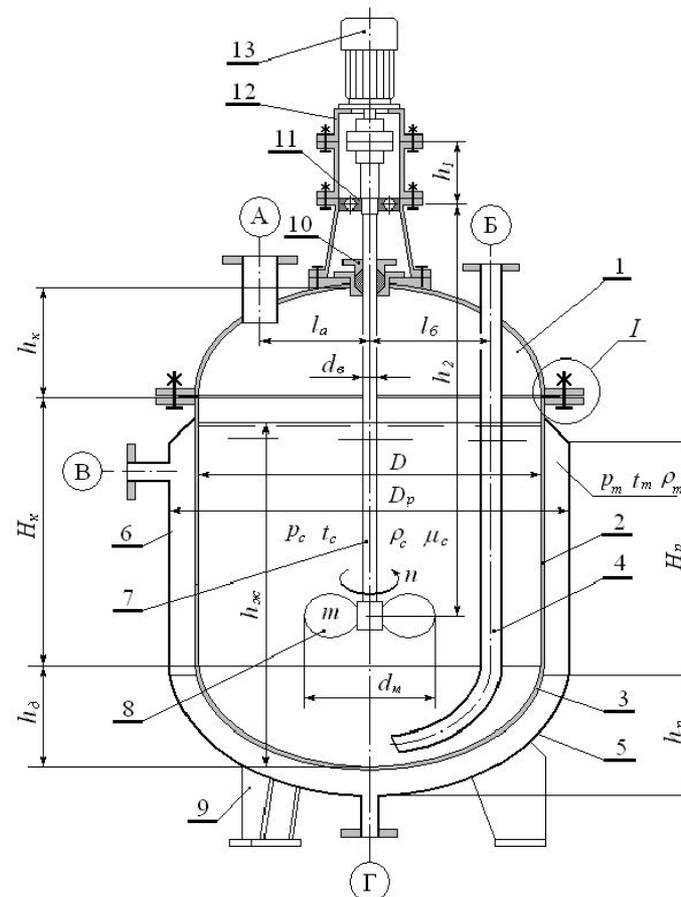


Рис. 1. Расчетная схема аппарата с рубашкой и перемешивающим устройством. Основные элементы аппарата: 1- крышка отъемная эллипсоидная; 2- обечайка корпуса цилиндрическая; 3- днище приварное эллипсоидное; 4- труба передавливания; 5- днище рубашки эллипсоидное; 6- обечайка рубашки цилиндрическая; 7- вал; 8- мешалка пропеллерная трехлопастная; 9- опора стойка; 10- уплотнение сальниковое; 11- подшипниковая опора; 12- опора привода; 13- мотор-редуктор.

6.2. Постановка задачи прочностного расчета, разработка расчетной модели

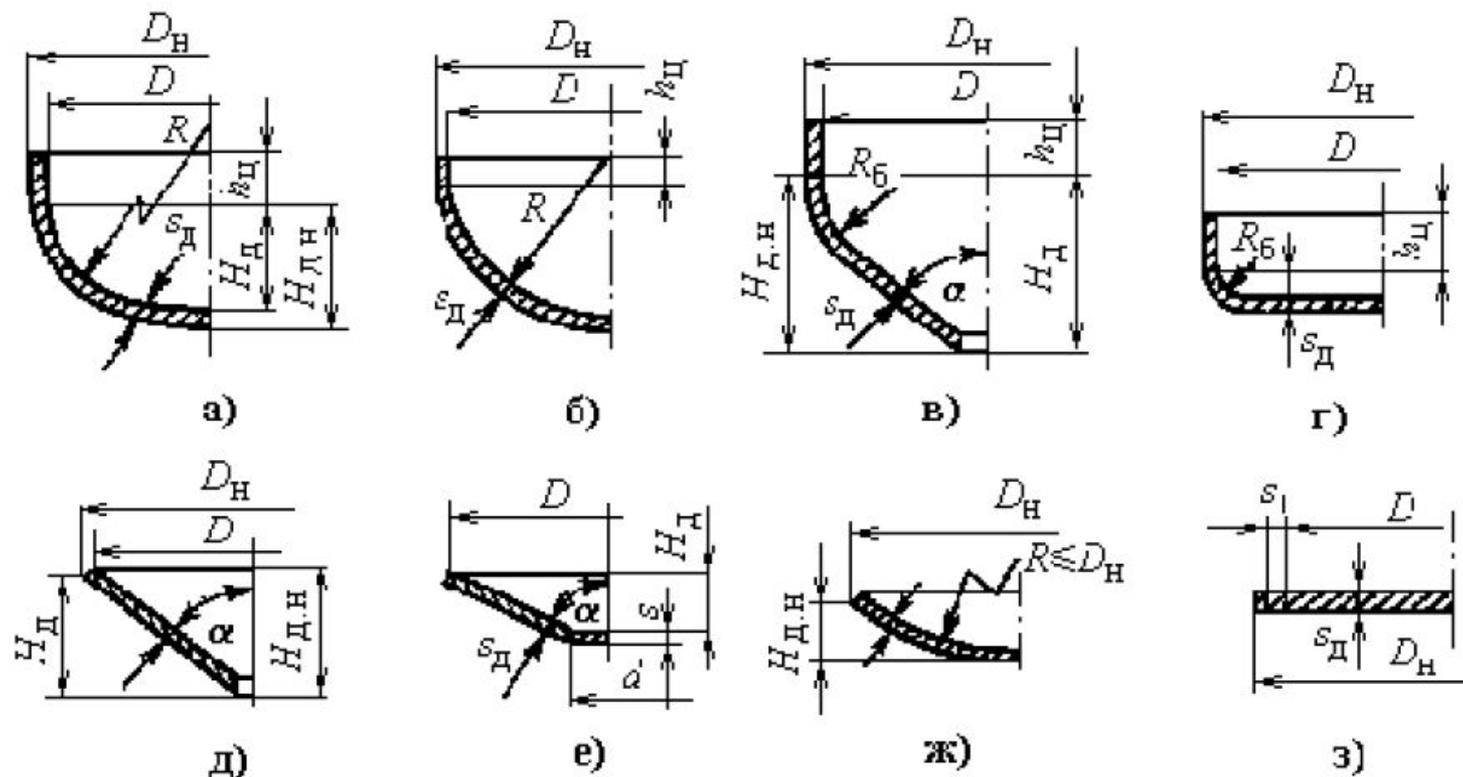


Рис. 2.17. Основные конструкции днищ сварных аппаратов:
 а - эллиптическое отбортованное; б – полушаровое отбортованное;
 в – коническое отбортованное; г – плоское отбортованное;
 д – коническое неотбортованное; е – коническое с плоским днищем;
 ж – сферическое неотбортованное; з – плоское неотбортованное

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.2. Постановка задачи прочностного расчета, разработка расчетной модели

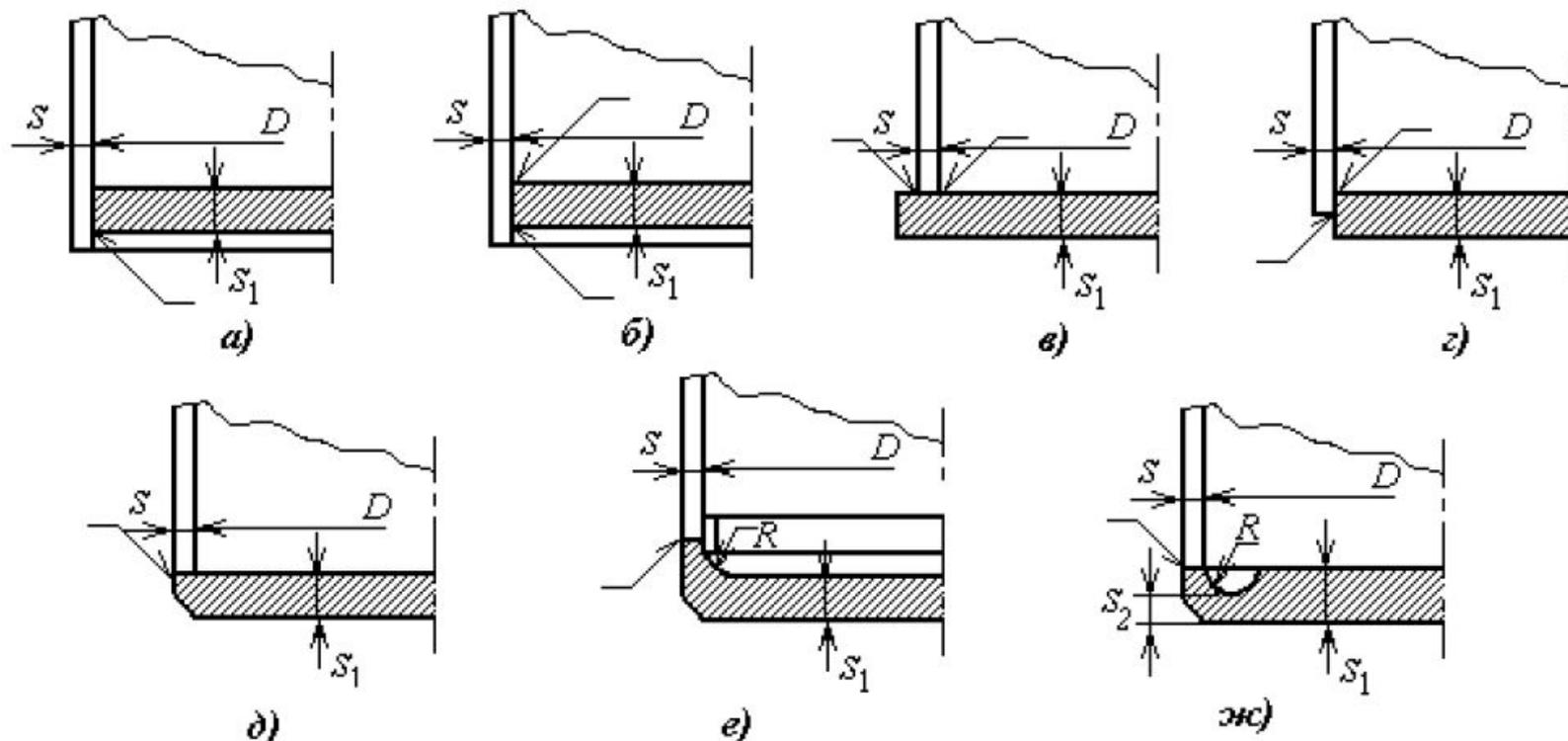


Рис. 2.19. Конструкции плоских днищ и сварное их соединение с обечайкой:
а – с односторонним угловым швом без скоса кромок; б-г – с двухсторонним угловым швом без скоса кромок; д – с односторонним угловым швом и скосом кромок; е – с односторонним стыковым швом и с подкладкой; ж – с односторонним стыковым швом в замок и скосом двух кромок

Нормативные параметры

- Допускаемое напряжение
- Модуль продольной упругости
- Нормативные нагрузки
- Коэффициент прочности сварных соединений
- Исполнительные размеры типовых элементов

Расчетные параметры

- Расчетная температура
- Давление (рабочее, расчетное, пробное, условное)

Допускаемые напряжения

- Для углеродистых и низколегированных сталей:

$$[\sigma] = \eta \cdot \min \left(\frac{\sigma_T \text{ или } \sigma_{T0,2}}{n_T}; \frac{\sigma_B}{n_B}; \frac{\sigma_{Д10^5}}{n_D}; \frac{\sigma_{1\%10^5}}{n_{П}} \right)$$

- Для аустенитных сталей;

$$[\sigma] = \eta \cdot \min \left(\frac{\sigma_{\hat{0}1,0}}{n_T}; \frac{\sigma_{\hat{A}}}{n_{\hat{A}}}; \frac{\sigma_{\ddot{A}10^5}}{n_{\ddot{A}}}; \frac{\sigma_{1\%10^5}}{n_{\dot{I}}} \right)$$

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.2. Постановка задачи прочностного расчета, разработка расчетной модели

Таблица 1.1 Значения пробных давлений

Сосуды	p_R , МПа	Пробное давление p_{np} , МПа
Все, кроме литых	<0.5	$\max\{1,5 p[\sigma]_{20}/[\sigma]; 0,2\}$
	≥ 0.5	$\max\{1,25 p[\sigma]_{20}/[\sigma]; p+0,3\}$
Литые	Независимо от давления	$\max\{1,5 p[\sigma]_{20}/[\sigma]; 0,3\}$

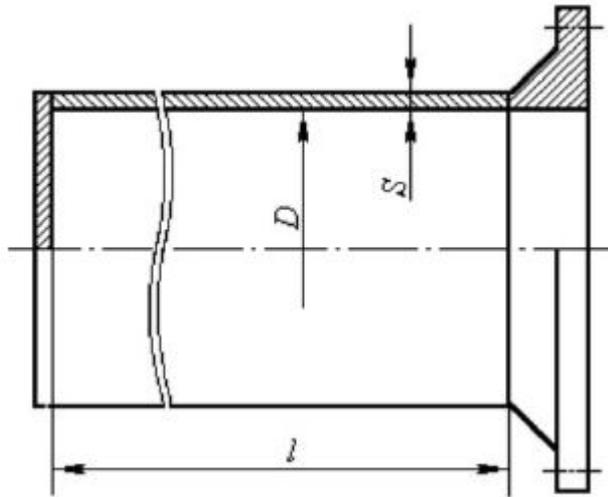
Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.2. Постановка задачи прочностного расчета, разработка расчетной модели

Коэффициенты прочности сварных швов

Вид сварного шва	Контроль шва	
	100 %	≤50 %
Стыковой или тавровый с двухсторонним проваром, выполненный автоматической и полуавтоматической сваркой	1,0	0,9
Стыковой с подваркой корня шва или тавровый с двухсторонним сплошным проваром, выполняемый вручную	1,0	0,9
Стыковой, доступный к сварке только с одной стороны и имеющий в процессе сварки металлическую подкладку со стороны корня шва, прилегающую по всей длине шва к основному металлу	0,9	0,8
Стыковой, выполняемый автоматической и полуавтоматической сваркой с одной стороны с флюсовой или керамической подкладкой	0,9	0,8
Стыковой, выполняемый вручную с одной стороны	0,9	0,65
Втавр – с конструктивным зазором свариваемых деталей	0,8	0,65

Обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением.



$$S_p = P \cdot D / (2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - P),$$

$$S \geq S_p + C,$$

$$[P] = 2\varphi \cdot [\sigma] \cdot (s - c) / (D + s - c).$$

Для гладких цилиндрических обечаек и труб с диаметром более 200 мм

$$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$$

Для труб с диаметром не более 200 мм при условии $\frac{s - c}{D} \leq 0,3$

Днища эллиптические и полушаровые, отбортованные

$$s_{\text{д}} \geq s_R + c, \quad s_R = \frac{p_R R}{2[\sigma]\varphi - 0,5 p_R}$$

где R – внутренний радиус кривизны в вершине выпуклого днища, в общем случае определяемый по формуле $R = D^2 / 4H_{\text{д}}$.

Для эллиптических днищ с $H_{\text{д}}=0,25D$ $R=D$, а для полушаровых днищ с $H_{\text{д}}=0,5D$ $R=0,5D$.

Допускаемое внутреннее давление

$$[p] = \frac{2(s_{\text{д}} - c)[\sigma]\varphi}{R + 0,5(s_{\text{д}} - c)}$$

Конические обечайки и днища

Толщина стенки конической обечайки или крышки

$$s_R = \frac{p_R D_c}{2[\sigma]\varphi_c - p_R} \cdot \frac{1}{\cos \alpha},$$

где D_c – расчетный диаметр конуса;

Допускаемое внутреннее давление

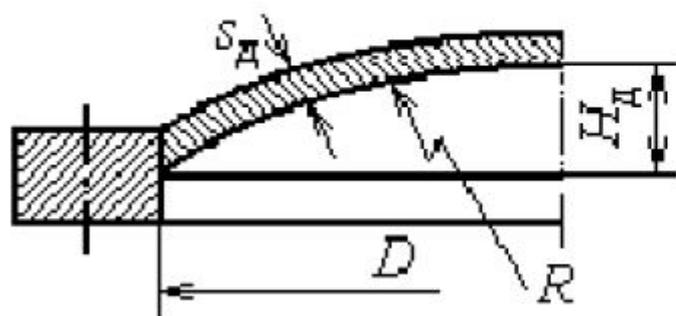
$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_c - (s_d - c)}{D_c / \cos \alpha + (s_d - c)}.$$

Условия применимости

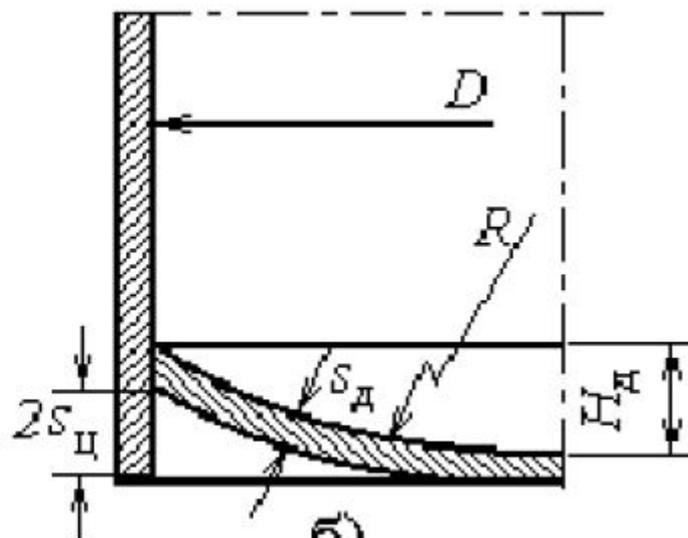
$$0,001 \leq s \cdot \cos \alpha / D \leq 0,05 \quad \text{при } 2\alpha \leq 120^\circ$$

с углом конуса $2\alpha > 120^\circ$ - без ограничений.

Сферические днища и крышки неотбортованные



а)



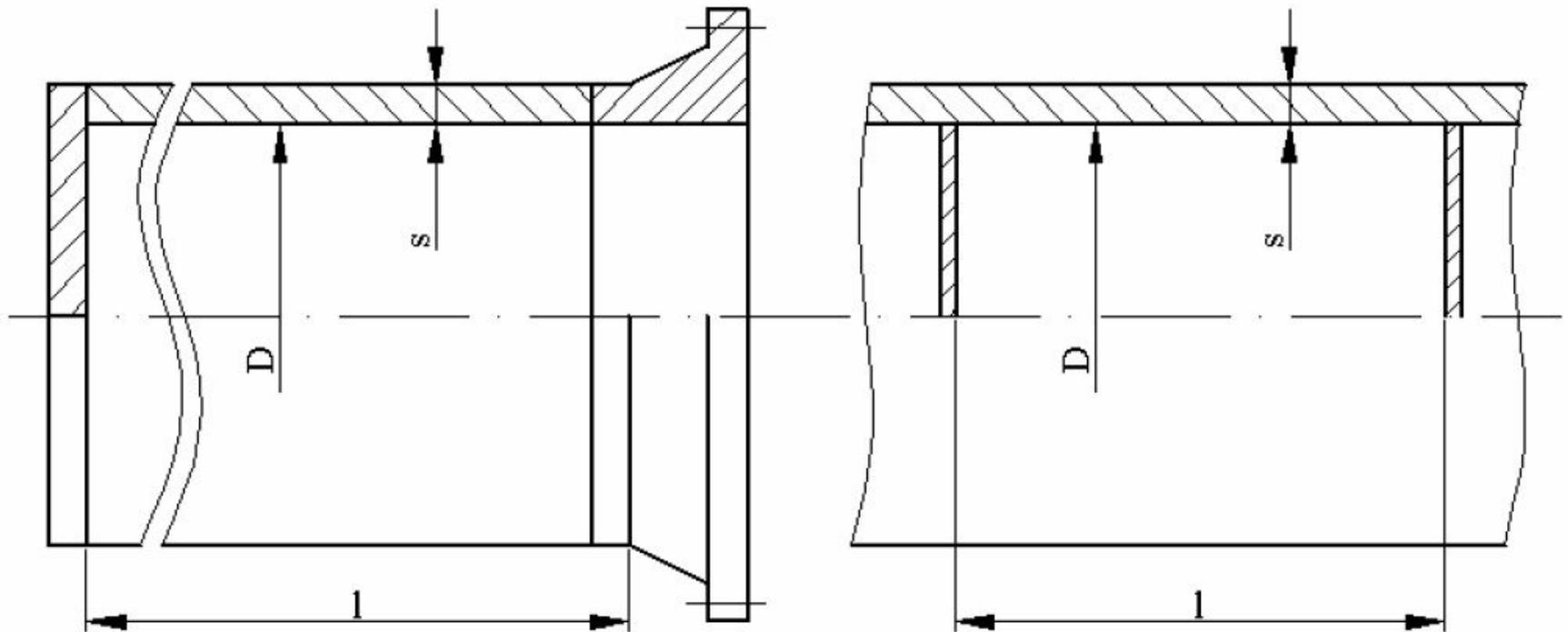
б)

Условия применимости формул $\frac{s_{\text{д}} - c}{R} \leq 0,1; \quad 0,95D \leq R \leq D.$

$$s_R = \frac{0,58 p_R R}{[\sigma] \varphi}$$

$$[p] = \frac{1,73 (s_{\text{д}} - c) [\sigma] \varphi}{R}$$

Расчет на устойчивость



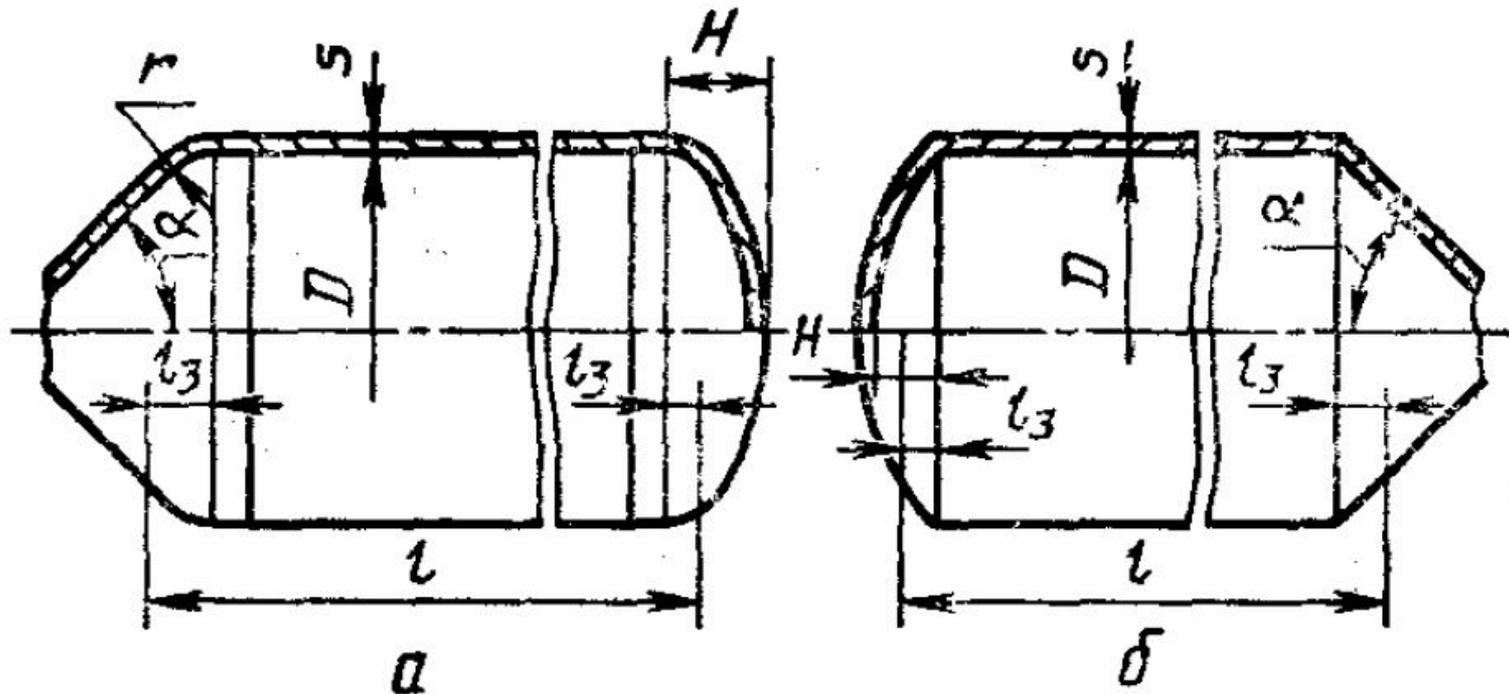
а)

б)

а - обечайка с фланцем или плоским днищем, б - обечайка с жесткими перегородками

Расчет на устойчивость

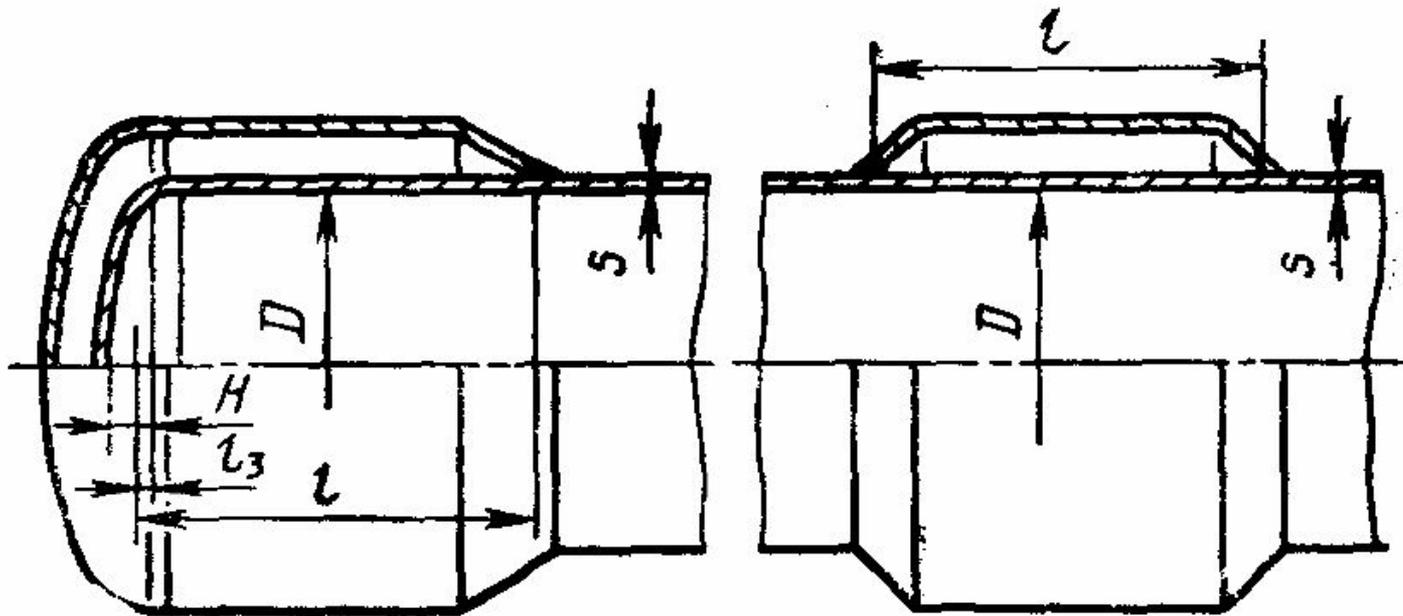
Гладкие обечайки с выпуклыми или коническими днищами



а - обечайка с отбортованными днищами,
б - обечайка с неотбортованными днищами

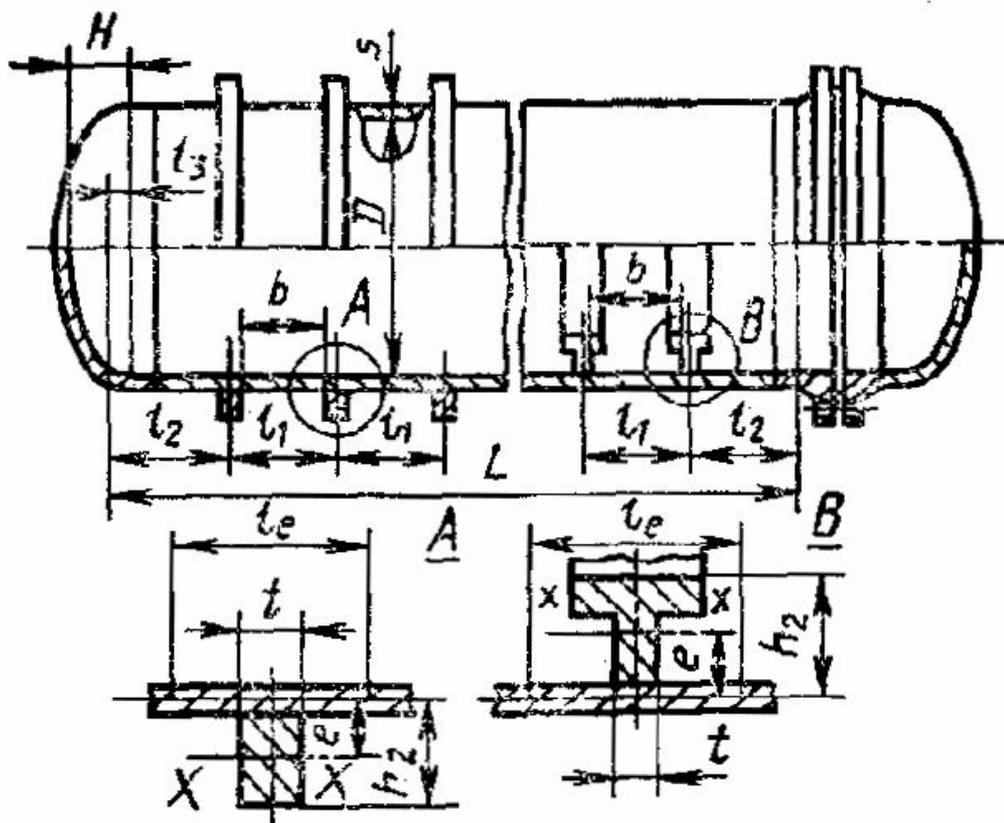
Расчет на устойчивость

Гладкие обечайки с рубашкой



Расчет на устойчивость

Цилиндрическая обечайка, подкреплённая кольцами жесткости



Расчет на устойчивость

При определении расчетной длины обечайки l или L длину примыкающего элемента l_3 следует определять по формулам

$$l_3 = \frac{H}{3} \text{ – для выпуклых днищ,}$$

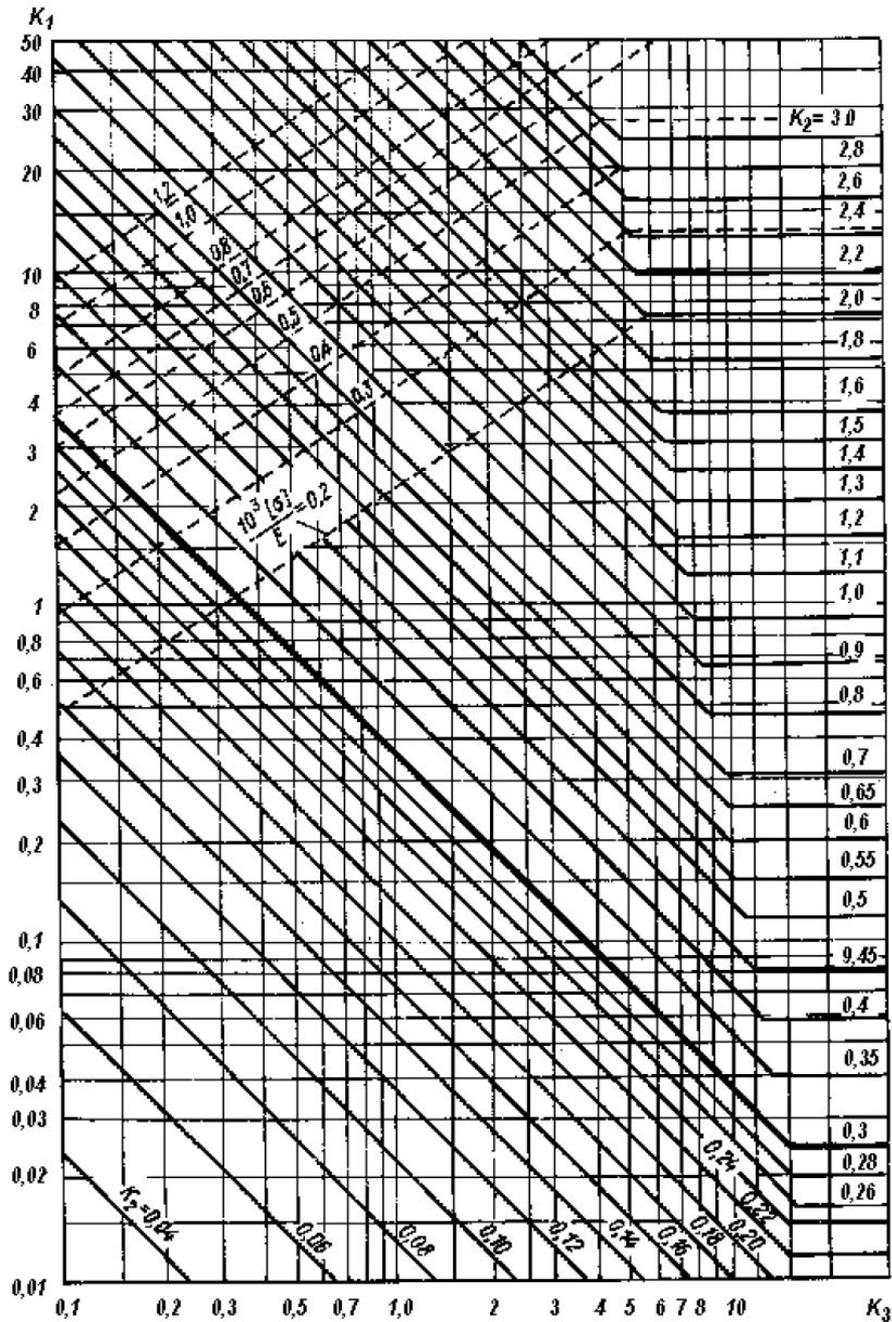
$$l_3 = \frac{D}{6 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \text{ – для конических обечаек (днищ) без отбортовки, но не более длины конического элемента;}$$

$$l_3 = \max \left(r \cdot \sin \alpha; \frac{D}{6 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) \text{ – для конических обечаек (днищ) с отбортовкой, но не более длины конического элемента.}$$

$$s \geq s_p + c,$$

$$s_p \cong \max \left\{ K_2 D \cdot 10^{-2}; \frac{1.1 p D}{2[\sigma]} \right\}.$$

$$K_1 = \frac{n_y \cdot p}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot E}; \quad K_2 = \frac{100 \cdot (S - C)}{D}; \quad K_3 = \frac{l}{D};$$



$$K_1 = \frac{n_u P_R}{2,4 \cdot 10^{-6} E};$$

$$K_3 = \frac{l_R}{D},$$

Расчет на устойчивость

Допускаемое наружное давление следует определять по формуле

$$[p] = \frac{[p]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\Pi}}{[p]_E}\right)^2}},$$

$$[p]_{\Pi} = \frac{2[\sigma](s-c)}{D + (s-c)},$$

$$[p]_E = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y B_1 l} \left[\frac{100(s-c)}{D} \right]^{2.5}$$

$$B_1 = \min \left\{ 1.0; 9.45 \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100(s-c)}} \right\}.$$

Расчет на устойчивость

Расчетные формулы применимы при отношении толщины стенки к диаметру

$$\frac{s-c}{D} \leq 0.1 \text{ для обечаек и труб при } D \geq 200 \text{ мм;}$$

$$\frac{s-c}{D} \leq 0.3 \text{ для труб при } D < 200 \text{ мм.}$$

Расчет на устойчивость

Допускаемое осевое сжимающее усилие

$$[F] = \frac{[F]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\Pi}}{[F]_E}\right)^2}},$$

где допускаемое осевое сжимающее усилие $[F]_{\Pi}$ из условия прочности

$$[F]_{\Pi} = \pi(D + s - c)(s - c)[\sigma],$$

а допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости $[F]_E$ из условия устойчивости

$$[F]_E = \min\left\{[F]_{E1}; [F]_{E2}\right\}.$$

местной устойчивости

$$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^2 \cdot \left[\frac{100(s - c)}{D}\right]^{2.5},$$

общей устойчивости

$$[F]_{E2} = \frac{\pi(D + s - c)(s - c)E}{n_y} \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2.$$

$$\text{если } \frac{l}{D} < 10 \quad [F]_E = [F]_{E1}$$

Расчет на устойчивость

Допускаемый изгибающий момент

$$[M] = \frac{[M]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{п}}}{[M]_{\text{е}}}\right)^2}},$$

допускаемый изгибающий момент $[M]_{\text{п}}$ из условия прочности

$$[M]_{\text{п}} = \frac{\pi}{4} D(D + s - c)(s - c)[\sigma] = \frac{D}{4} [F]_{\text{п}}$$

допускаемый изгибающий момент $[M]_{\text{е}}$ из условия устойчивости

$$[M]_{\text{е}} = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^3 \cdot \left[\frac{100(s - c)}{D} \right]^{2.5} = \frac{D}{3.5} [F]_{\text{е1}}$$

Расчет на устойчивость

Допускаемое поперечное усилие

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_E}\right)^2}}$$

допускаемое поперечное усилие $[Q]_{\Pi}$ из условия прочности

$$[Q]_{\Pi} = 0.25\pi D(s - c)[\sigma]$$

допускаемое поперечное усилие $[Q]_E$ из условия устойчивости в пределах упругости

$$[Q]_E = \frac{2.4E(s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0.18 + 3.3 \frac{D(s - c)}{l^2} \right]$$

Расчет на устойчивость

Обечайки с кольцами жесткости, нагруженные внутренним избыточным давлением

$$K_4 = \frac{p(D + s - c)}{2[\sigma]\varphi_p(s - c)} - 1.$$

Если $K_4 \leq 0$, то укрепления кольцами жесткости не требуется

$$0 < K_4 < 2\frac{\varphi_m}{\varphi_p} - 1$$

расстояние между двумя кольцами жесткости

$$b \leq \sqrt{D(s - c) \left[\frac{2}{K_4} - \frac{\varphi_p}{\varphi_m} \left(1 + \frac{1}{K_4} \right) \right]}$$

Расчет на устойчивость

площадь поперечного сечения кольца

$$A_{\kappa} \geq l_1 (s - c) \frac{[\sigma] \varphi_p}{[\sigma]_{\kappa} \varphi_{\kappa}} \cdot K_4.$$

Если $K_4 \geq 2 \frac{\varphi_m}{\varphi_p} - 1$ толщину стенки необходимо увеличить

чтобы выполнялось

$$0 < K_4 < 2 \frac{\varphi_m}{\varphi_p} - 1$$

Расчет на устойчивость

Допускаемое внутреннее избыточное давление $[p] = \min\{[p]_1; [p]_2\}$

Допускаемое внутреннее избыточное давление $[p]_1$ из условия прочности всей обечайки

$$[p]_1 = \frac{2[\sigma]\varphi_p(s-c) + 2\frac{A_k}{l_1}[\sigma]_k\varphi_k}{D+(s-c)}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление $[p]_2$ из условия прочности обечайки между двумя соседними кольцами жесткости

$$[p]_2 = \frac{2[\sigma]\varphi_m(s-c)}{D+(s-c)} \frac{2 + \lambda_{II}^2}{1 + \frac{\varphi_m \lambda_{II}^2}{\varphi_p}}$$

$$\lambda_{II}^2 = \frac{b^2}{D(s-c)}$$

Расчет на устойчивость

Обечайки с кольцами жесткости, нагруженные наружным давлением

эффективную длину стенки l_e обечайки, учитываемую при определении эффективного момента инерции, следует определять из условия

$$l_e = \min \left\{ l_1; t + 1.1 \sqrt{D(s-c)} \right\}$$

эффективный момент инерции I расчетного поперечного сечения кольца жесткости следует определять по формуле

$$I = I_x + \frac{l_1(s-c)^3}{10.9} + e^2 \frac{A_x l_e (s-c)}{A_x + l_e (s-c)}$$

коэффициент жесткости обечайки k , подкрепленной кольцами жесткости

$$k = \sqrt{\frac{10.9I}{l_1(s-c)^3}}$$

Расчет на устойчивость

Допускаемое наружное давление $[p] = \min\{[p]_1; [p]_2\}$

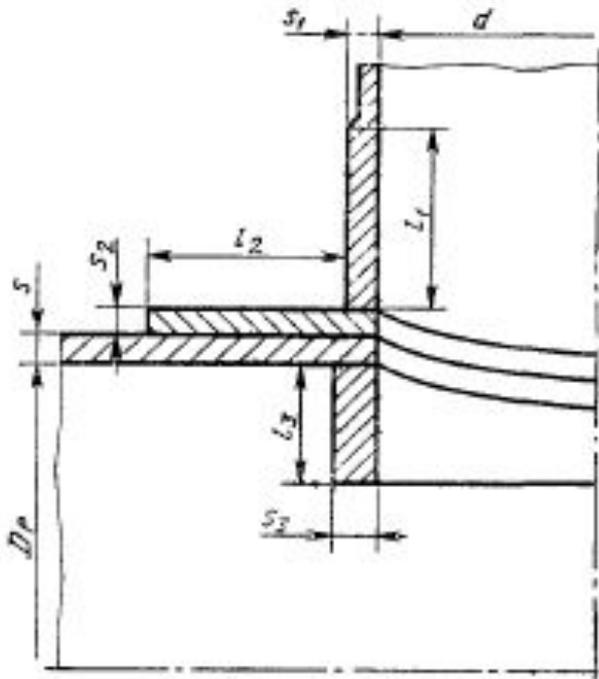
$$[p]_1 = \frac{[p]_{1П}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{1П}}{[p]_{1E}}\right)^2}}$$

$$[p]_{1E} = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} E D}{k B_2 n_y L} \left[\frac{100k(s-c)}{D} \right]^{2.5}$$

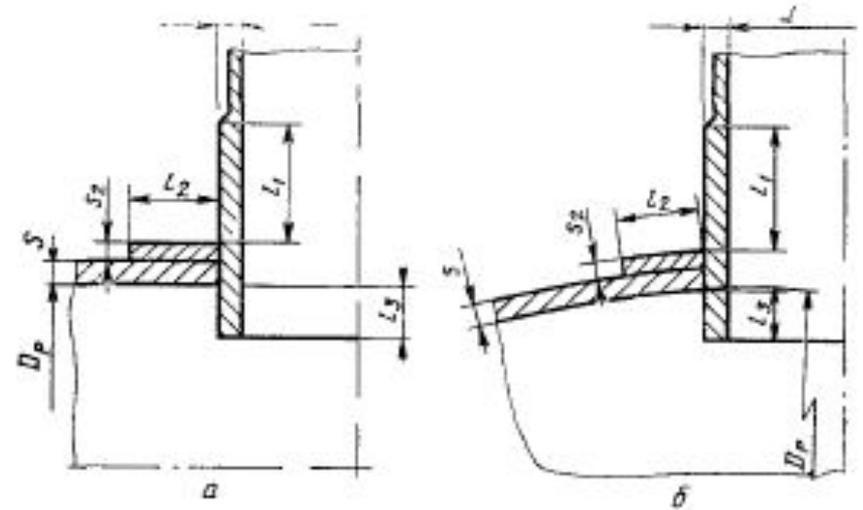
$$B_2 = \min\left\{1.0; 9.45 \frac{D}{L} \sqrt{\frac{D}{100k(s-c)}}\right\}$$

$$I_p = \frac{0.1 p D^3 l_1}{E} \frac{n_y}{2.4} K_5$$

Укрепление отверстий

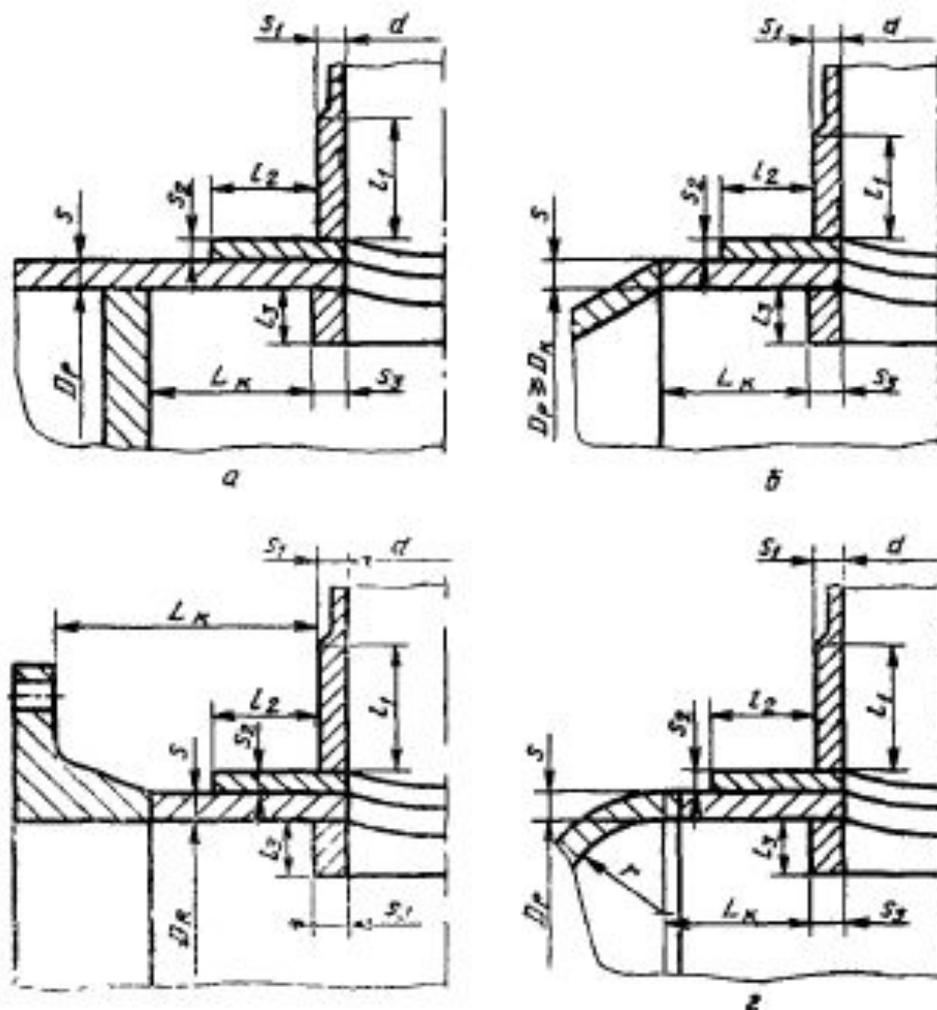


расчетная схема соединения штуцера со стенкой сосуда



Укрепление отверстий при наличии проходящего штуцера

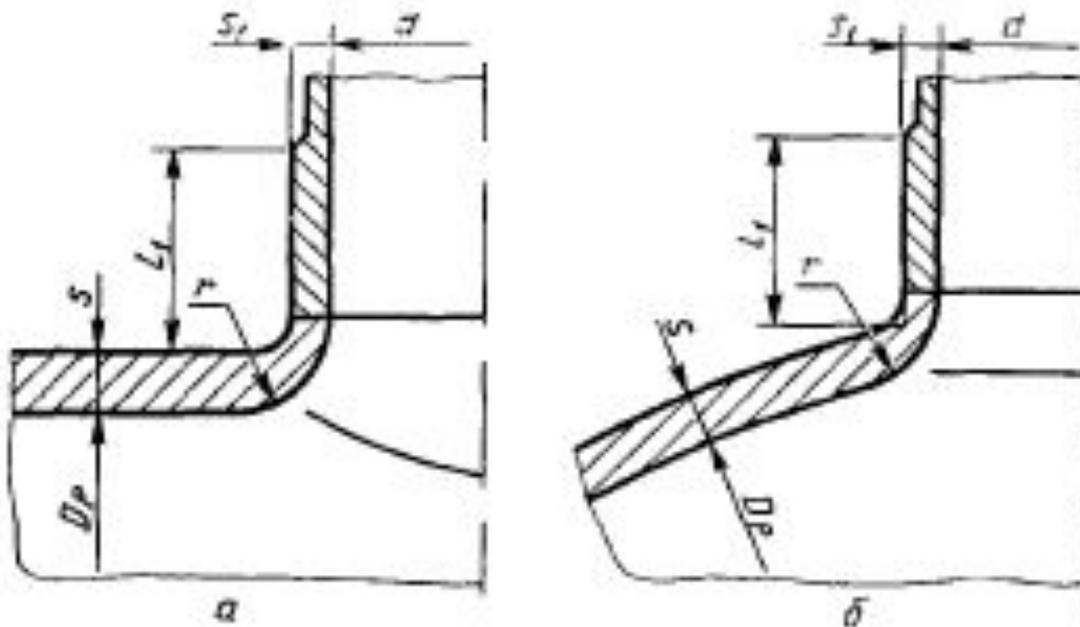
Укрепление отверстий



Укрепление отверстий при наличии близко расположенных конструктивных элементов (непроходящие штуцера)

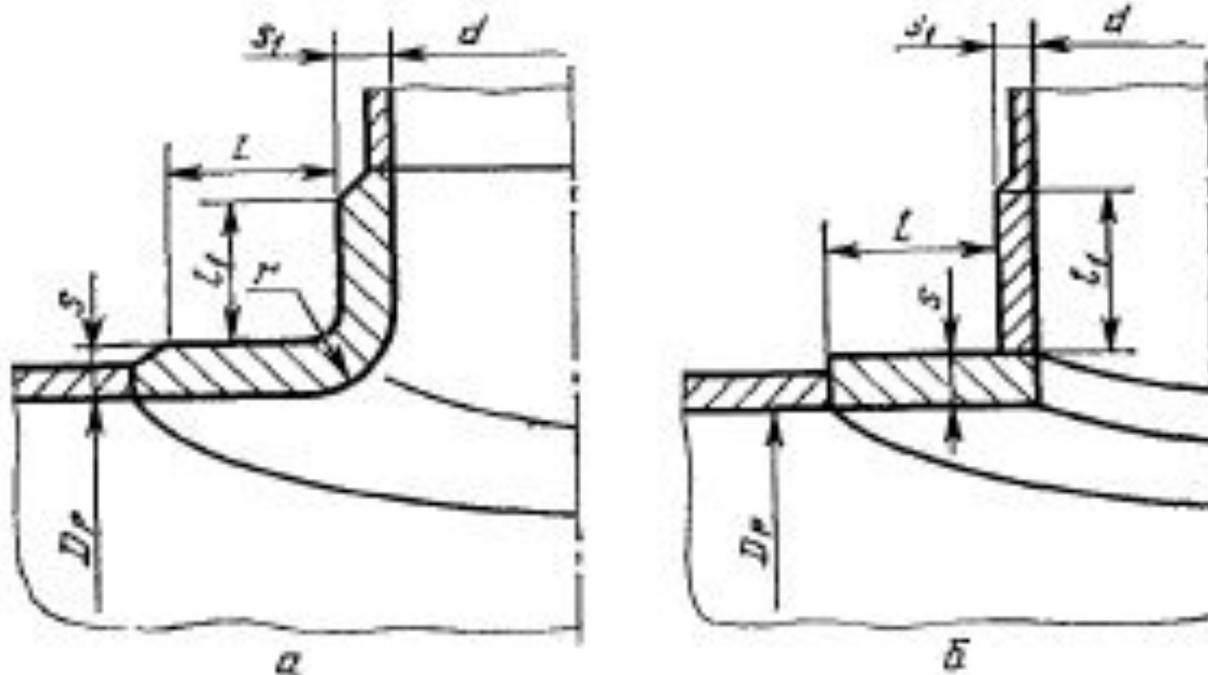
Укрепление отверстий

Укрепление отверстия отбортовкой

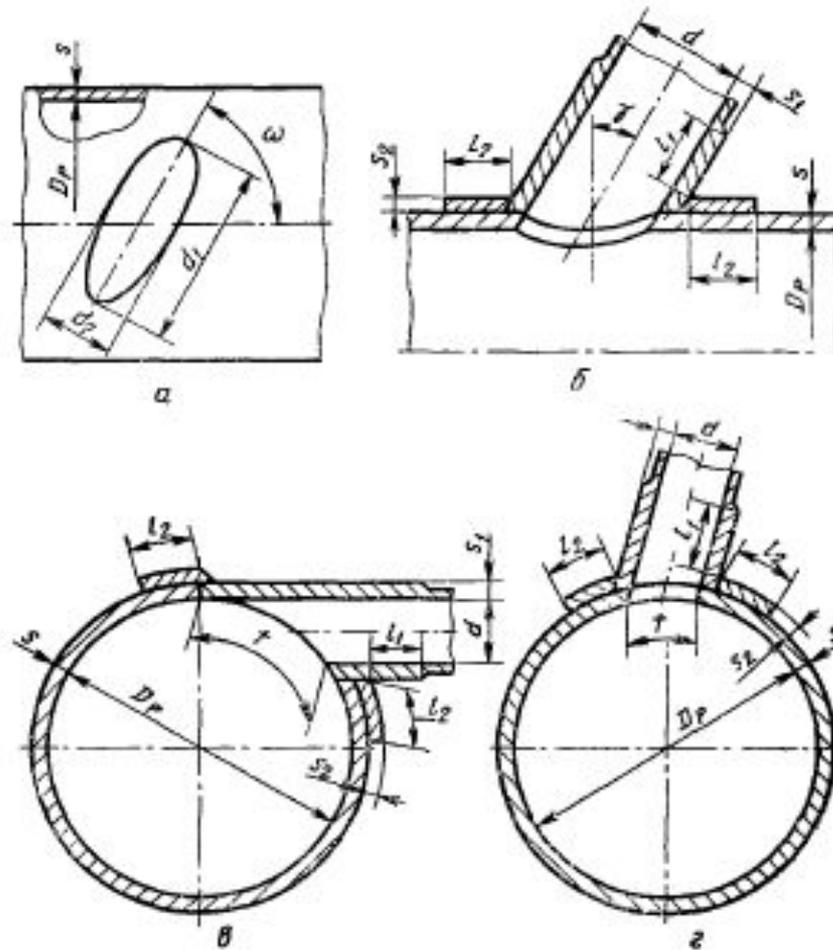


Укрепление отверстий

Укрепления отверстия торообразной вставкой или сварным кольцом

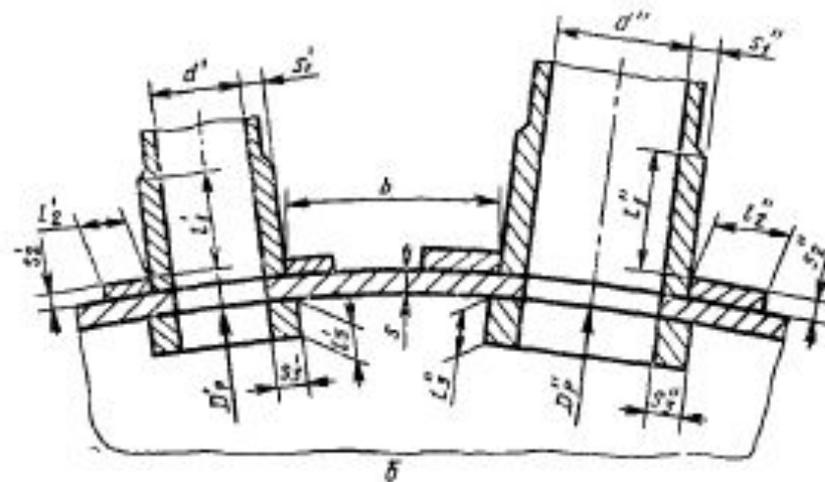
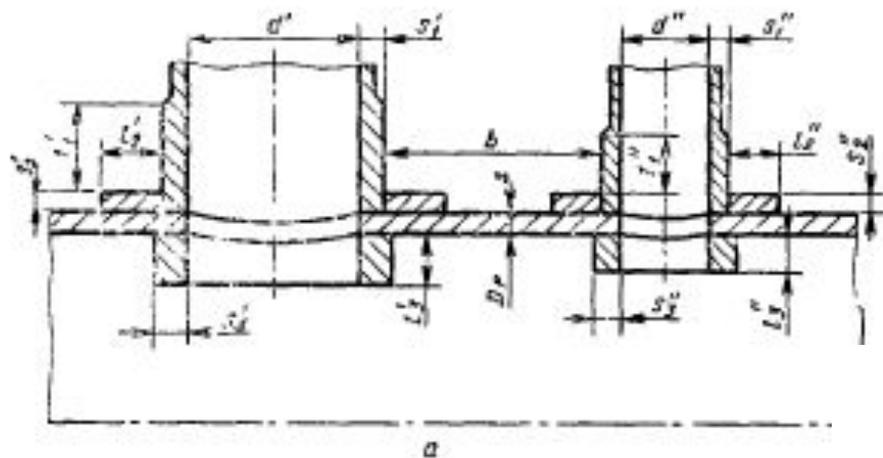


Наклонные штуцера на обечайке

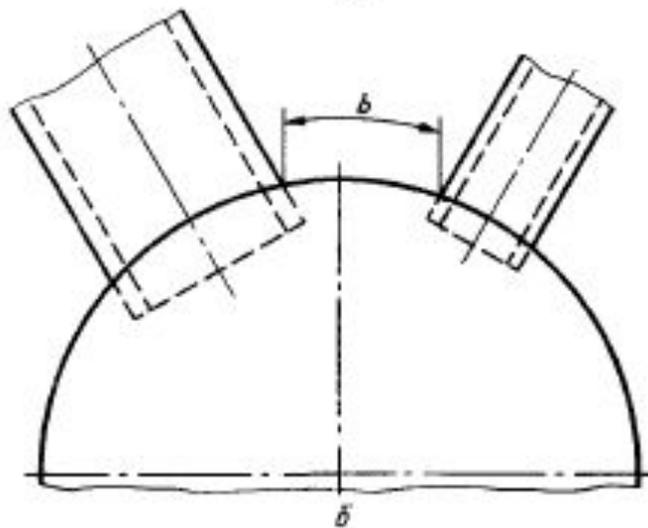
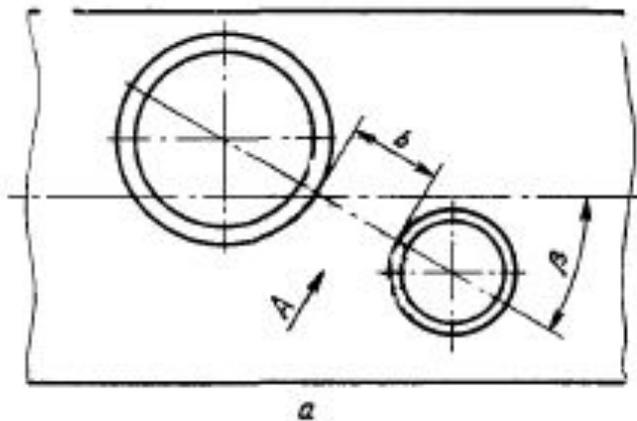


Укрепление отверстий

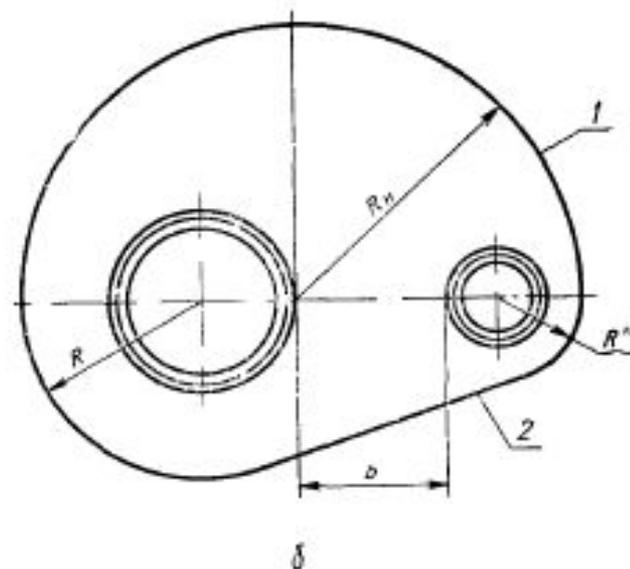
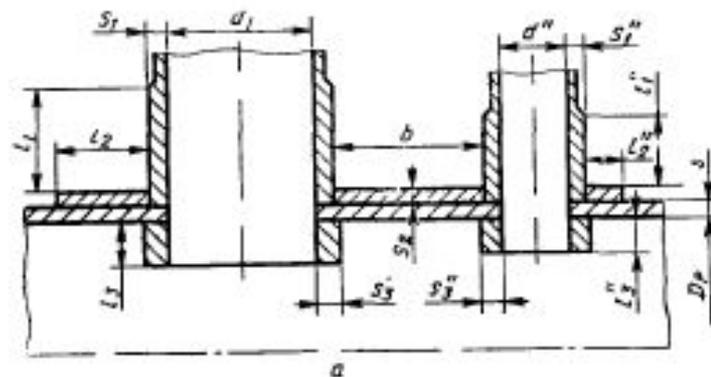
Укрепление взаимовлияющих отверстий



Общий случай расположения взаимовлияющих отверстий



Совместное укрепление взаимовлияющих отверстий



1 — укрепление круговым накладным кольцом;
2 — укрепление несимметричным кольцом

Укрепление отверстий

Расчетные диаметры укрепляемых элементов

для цилиндрической обечайки

$$D_p = D;$$

для конической обечайки, перехода или днища

$$D_p = \frac{D_k}{\cos \alpha};$$

для эллиптических днищ

$$D_p = \frac{D^2}{2H} \sqrt{1 - 4 \frac{(D^2 - 4H^2)}{D^4} \cdot x^2}$$

в случае эллиптических днищ при $H = 0,25 D$

$$D_p = 2D \sqrt{1 - 3 \left(\frac{x}{D}\right)^2};$$

для сферических днищ, а также торосферических днищ

$$D_p = 2R$$

Укрепление отверстий

Расчетный диаметр определяют $d_{0p} = 0,4 \sqrt{D_p (s-c)}$.

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \sqrt{(d+2c_s)(s_1-c_s)} \right\};$$

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \sqrt{(d+2c_s)(s_3-c_s-c_{s1})} \right\}.$$

$$s_{1p} = \frac{p(d+2c_s)}{2[\sigma]_t \cdot \varphi_1 - p}$$

$$L_0 = \sqrt{D_p (s-c)} .$$

Укрепление отверстий

Отверстие считается одиночным, если $b \geq \sqrt{D_p' (s-c)} + \sqrt{D_p'' (s-c)}$

$$d_0 = 2 \left(\frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \sqrt{D_p (s-c)} .$$

Условие укрепления отверстия утолщением стенки аппарата, штуцером, накладным кольцом или комбинированным укреплением

$$l_{1p} (s_1 - s_{1p} - c_s) x_1 + l_{2p} s_2 x_2 + l_{3p} (s_3 - c_s - c_{s1}) x_3 + l_p (s - s_p - c) \geq 0,5 (d_p - d_{0p}) s_p .$$

Укрепление отверстий

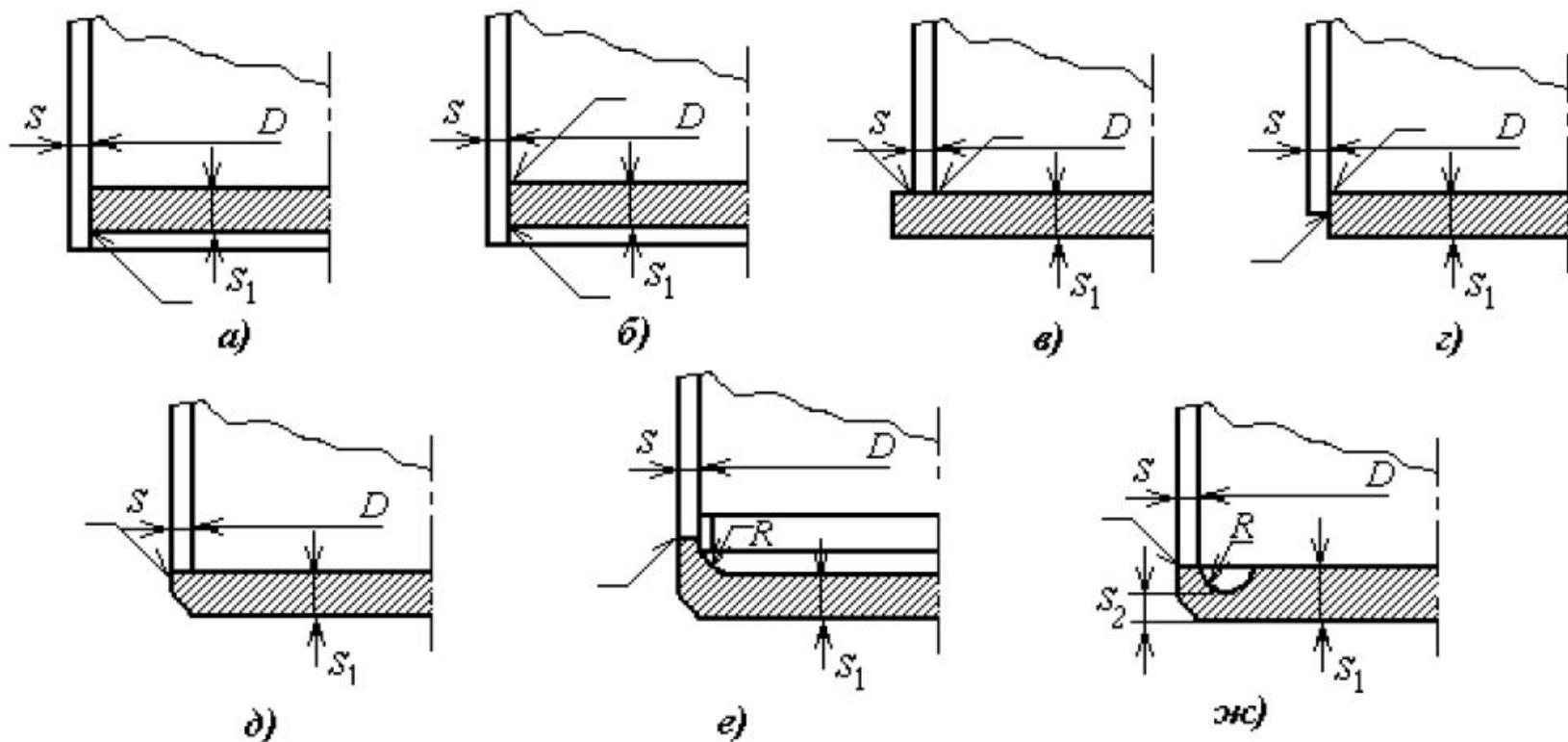
Допускаемое внутреннее избыточное давление

$$[p] = \frac{2 K_1 (s-c) \varphi [\sigma]}{D_p + (s-c) V} \cdot V$$

где $K_1 = \begin{cases} 1 - \text{для цилиндрических и конических обечаек;} \\ 2 - \text{для выпуклых днищ.} \end{cases}$

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p}(s_1 - c_s) \kappa_1 + l_{2p}s_2\kappa_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1}) \kappa_3}{l_p (s-c)}}{1 + 0,5 \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \frac{d + 2c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}} \right\}$$

Плоские круглые приварные днища и крышки



а – с односторонним угловым швом без скоса кромок; б-г – с двухсторонним угловым швом без скоса кромок; д – с односторонним угловым швом и скосом кромок; е – с односторонним стыковым швом и с подкладкой; ж – с односторонним стыковым швом в замок и скосом двух кромок

Толщина плоских круглых крышек и днищ

$$s_1 \geq KK_0 D_R \sqrt{\frac{P_R}{[\sigma] \varphi}} + c.$$

Коэффициент K в зависимости от конструкции сварного соединения плоских круглых днищ с обечайкой

№ рисунка	Вид соединения	$(s-c)/(s_1-c)$	K
<i>a</i>	Тавровое	—	0,53
<i>б</i>	Тавровое	—	0,50
<i>в</i>	Тавровое	—	0,50
<i>г</i>	Угловое	$<0,5$;	0,41;
		$\geq 0,5$	0,38
<i>д</i>	Угловое	—	0,45
<i>e</i>	Стыковое:		
	при $l \geq \sqrt{D(s-c)}$	—	$\max \{0,35; 0,45 [1 - 0,23(s-c)/(s_1-c)]\}$
	при $l < \sqrt{D(s-c)}$	—	$\max \{0,4; 0,47 [1 - 0,23(s-c)/(s_1-c)]\}$
<i>ж</i>	Стыковое:	$<0,5$	0,41
		$\geq 0,5$	0,38

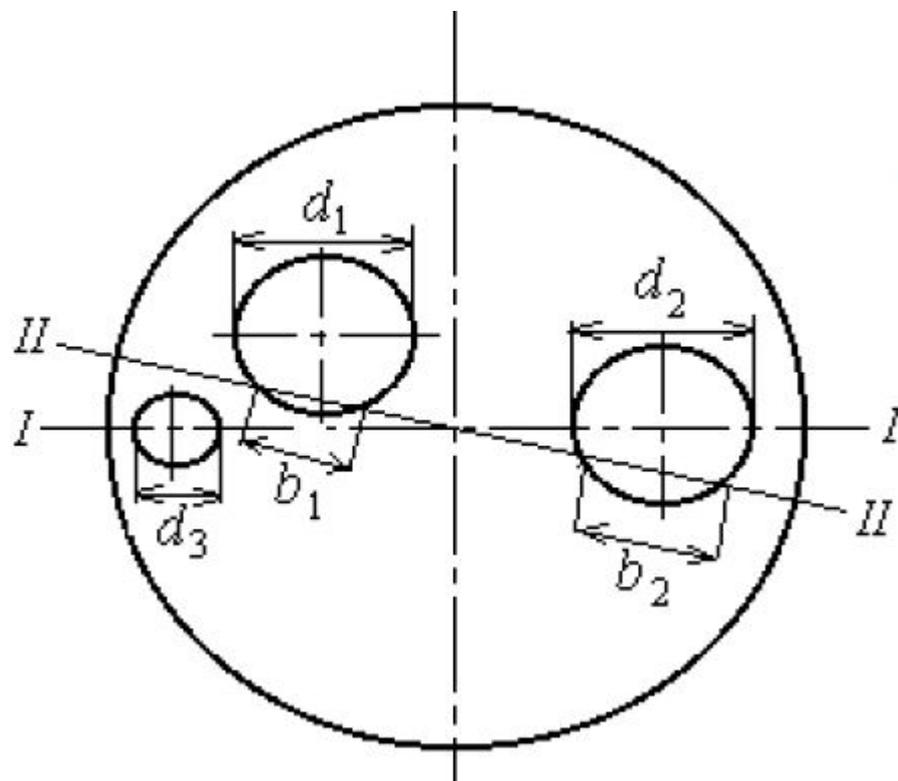
Коэффициент K_0 учитывает ослабление днища отверстиями

$$K_0 = \sqrt{1 + \frac{d}{D_R} + \left(\frac{d}{D_R}\right)^2};$$

при наличии нескольких отверстий

$$K_0 = \sqrt{\frac{1 - \sum (d_i / D_R)^3}{1 - \sum d_i / D_R}}.$$

Для днищ и крышек без отверстий $K_0=1$.

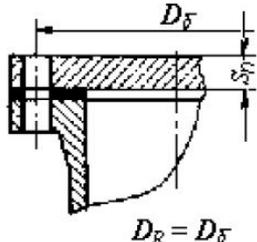
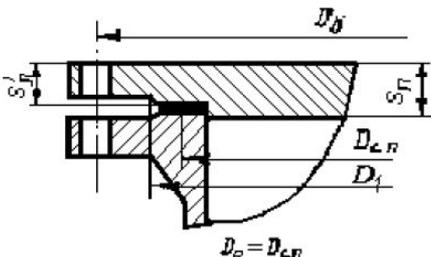
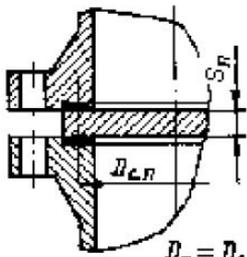


$$\sum d_i = \max\{d_2 + d_3; b_1 + b_2\}$$

Допускаемое давление в рабочем состоянии

$$[p] = \left(\frac{s_1 - c}{KK_0 D_R} \right)^2 [\sigma] \varphi$$

Коэффициент K и расчетный диаметр D_R плоских круглых съемных крышек

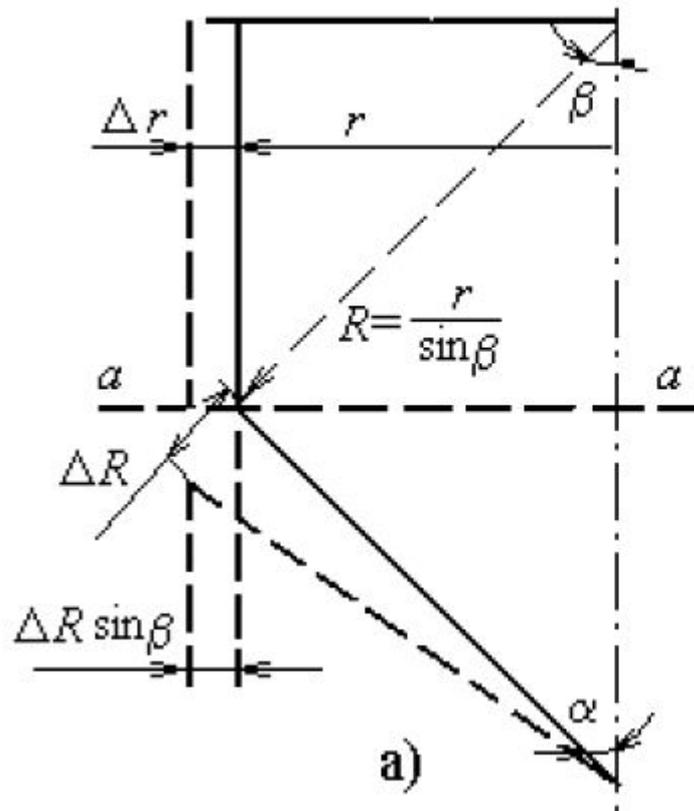
Тип крепления крышки	Эскиз соединения	K
1	 <p style="text-align: center;">$D_R = D_{\delta}$</p>	0.40
2	 <p style="text-align: center;">$D_R = D_{ц.н.}$</p>	$K = 0.41 \sqrt{\frac{1 + 3\psi(D_{\delta} / D_{ц.н.} - 1)}{D_{\delta} / D_{ц.н.}}}$ <p style="text-align: center;">где $\psi = 1 + R_n / Q_{д}$</p>
3	 <p style="text-align: center;">$D_R = D_{ц.н.}$</p>	0.41
<p>Примечание: R_n - реакция прокладки; $R_n = 2\pi D_{ц.н.} b_{п} m p_R$, где $b_{п}$ - эффективная ширина прокладки, m - расчетная величина, выбираемая по табл. 6.6 (см. разд. 6.6); $Q_{д}$ - сила от внутреннего давления на крышку; $Q_{д} = 0,785 D_{ц.н.}^2 p_R$.</p>		

Толщина плоской круглой крышки

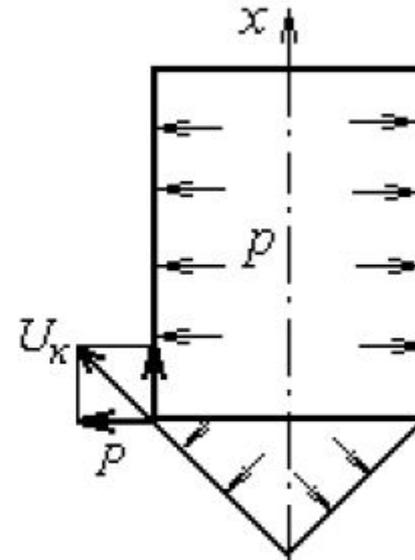
$$s'_{\Pi} \geq \max \left\{ K' \sqrt{P_{\delta \max} / [\sigma]}; 0,6 P_{\delta \max} / ([\sigma] D_{C.\Pi}) \right\} + c,$$

где $K' = 0,8 \sqrt{(D_{\delta} / D_{C.\Pi}) - 1}$

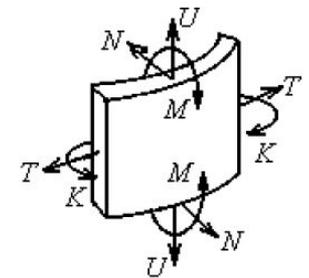
Краевой эффект



$$\Delta r \neq \Delta R \sin \beta$$



б)



а) при шарнирном закреплении частей $M_0=0$ и P_0 находится из уравнения

$$\Delta'_{\text{вн}} + \Delta'_{(P_0-P)} = \Delta''_{\text{вн}} + \Delta''_{(P_0-P)};$$

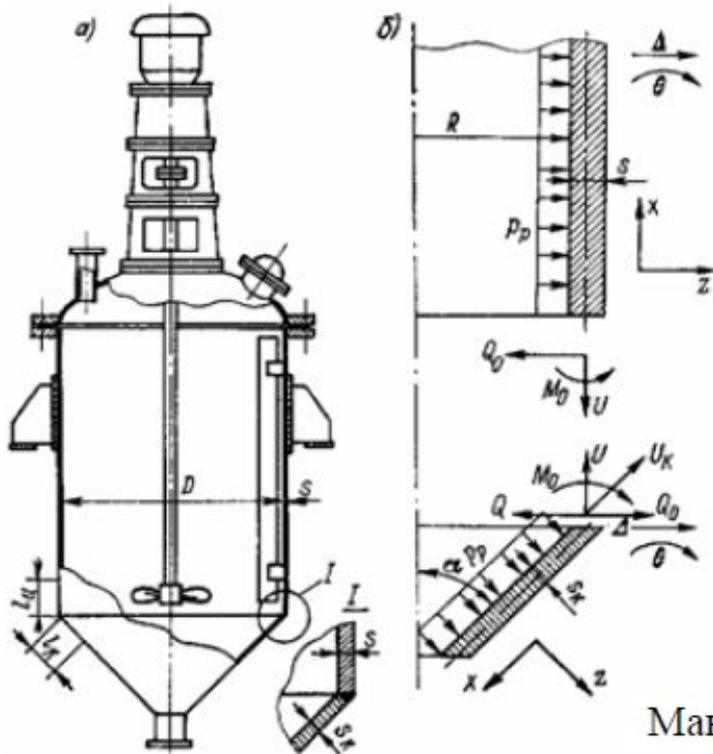
б) край оболочки жестко заделан в недеформируемое основание

$$\begin{cases} \Delta'_{\text{вн}} + \Delta'_{(P_0-P)} + \Delta'_{M_0} = 0; \\ \theta'_{\text{вн}} + \theta'_{(P_0-P)} + \theta'_{M_0} = 0; \end{cases}$$

в) край оболочки шарнирно соединен с недеформируемым основанием

$$\Delta'_{\text{вн}} + \Delta'_{(P_0-P)} = 0.$$

Краевая задача



$$\left. \begin{aligned} \Delta_{P}^U - \Delta_{Q_0}^U + \Delta_{M_0}^U &= \Delta_{P}^K + \Delta_{(Q_0-Q)}^K + \Delta_{M_0}^K, \\ -\theta_{P}^U + \theta_{Q_0}^U - \theta_{M_0}^U &= \theta_{P}^K + \theta_{(Q_0-Q)}^K + \theta_{M_0}^K, \end{aligned} \right\}$$

Суммарные напряжения

меридиональное напряжение $\sigma_{m0} = \sigma_{m0}^P - \sigma_{m0}^{Q_0} + \sigma_{m0}^{M_0}$

кольцевое напряжение $\sigma_{t0} = \sigma_{t0}^P - \sigma_{t0}^{Q_0} + \sigma_{t0}^{M_0}$

Максимальное напряжение на краю

$$\sigma_{\max 0} = \max \left\{ \left| \sigma_{m0}^{\max} \right|, \left| \sigma_{t0}^{\max} \right| \right\}$$

Общие положения

- Расчетную температуру используют для определения физико-механических характеристик материала и допустимых напряжений.
- Расчетную температуру определяют на основании теплотехнических расчетов или результатов испытаний.

За расчетную температуру стенки сосуда принимают наибольшее значение температуры стенки. При температуре ниже $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ за расчетную температуру при определении допустимых напряжений принимают температуру $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Если невозможно провести тепловые расчеты или измерения и если во время эксплуатации среда соприкасается со стенкой, то за расчетную температуру следует принимать наибольшую температуру среды, но не ниже $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.2. Типовые конструкции аппаратов высокого давления

- Под рабочим давлением для сосуда следует понимать максимальное внутреннее избыточное давление, возникающее при нормальном протекании рабочего процесса, без учета гидростатического давления среды и без учета допустимого кратковременного повышения давления во время действия предохранительного клапана или других предохранительных устройств.
- Под расчетным давлением для элементов сосудов следует понимать давление, на которое проводится их расчет на прочность. Расчетное давление для элементов сосуда принимают равным максимально возможному рабочему давлению. При повышении давления в сосуде во время действия предохранительных устройств, ограничивающих давление более чем на 10% по сравнению с рабочим, элементы сосуда следует рассчитывать на давление, равное 90% давления при действии этих устройств.
- Под давлением опрессовки следует понимать однократное давление при изготовлении сосуда, переводящее внутренние слои многослойной стенки за предел текучести.
- Многослойные сосуды следует подвергать испытанию повышенным избыточным давлением опрессовки в соответствии с нормативным документом на изготовление. При нагружении многослойного сосуда давлением опрессовки необходимо проводить проверку прочности деталей по формулам соответствующих разделов, подставляя в расчетные формулы значение давления опрессовки вместо расчетного давления. При этом коэффициент запаса прочности по пределу текучести при температуре испытаний принимают согласно таблице 4.1.

Указанную проверку не проводят для многослойных цилиндрических обечаек и при расчете укрепления отверстий.

- При определении расчетной толщины стенки элементов сосудов, работающих при температуре свыше $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, толщину аустенитного наплавленного или плакирующего защитного слоя, а также футеровки и аустенитной центральной обечайки не учитывают.

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.2. Типовые конструкции аппаратов высокого давления

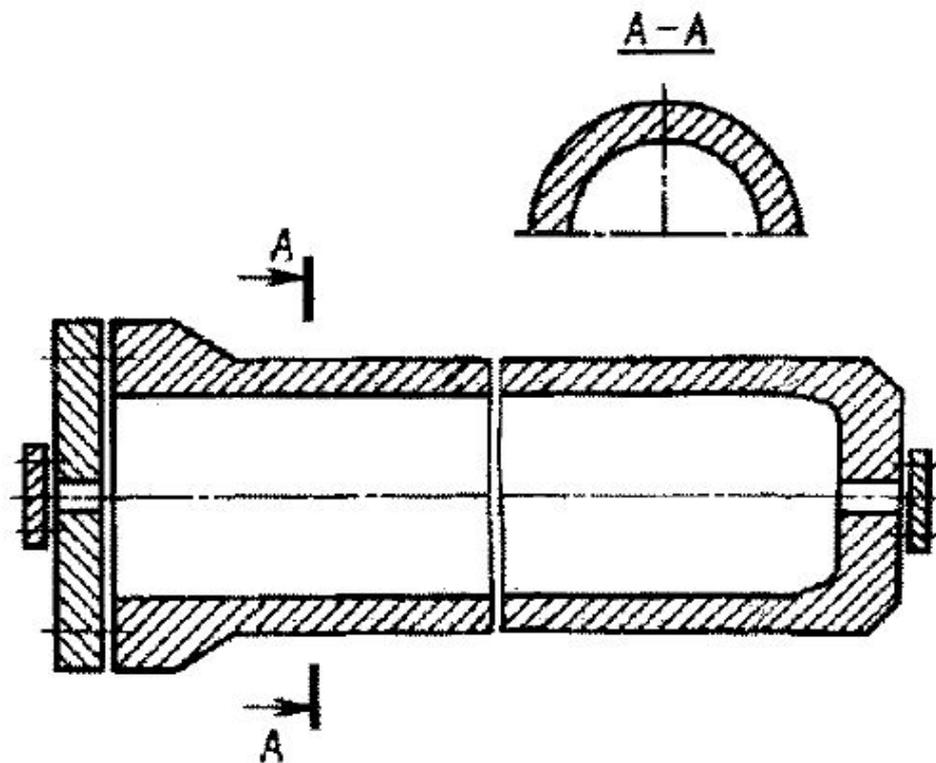


Рис. 8.1. Кованый корпус СВД

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.2. Типовые конструкции аппаратов высокого давления

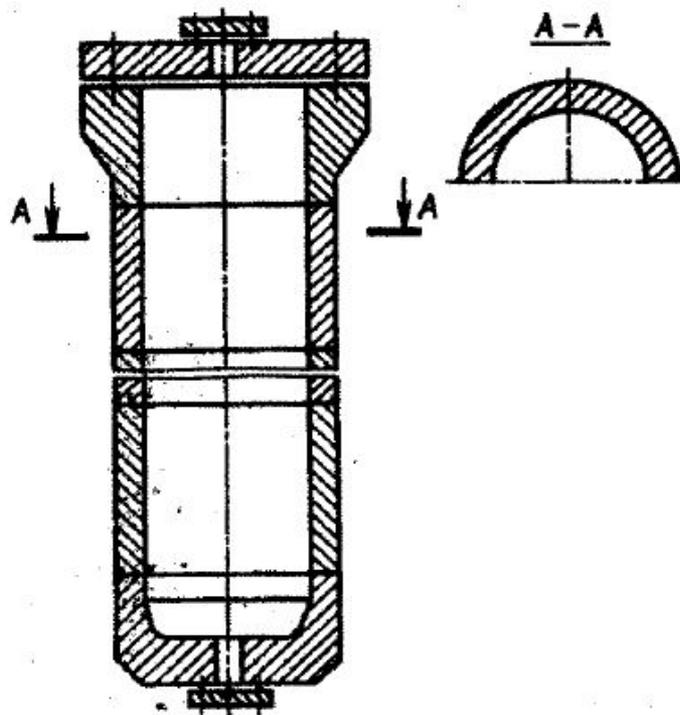


Рис. 8.2. Кованосварной СВД

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.2. Типовые конструкции аппаратов высокого давления

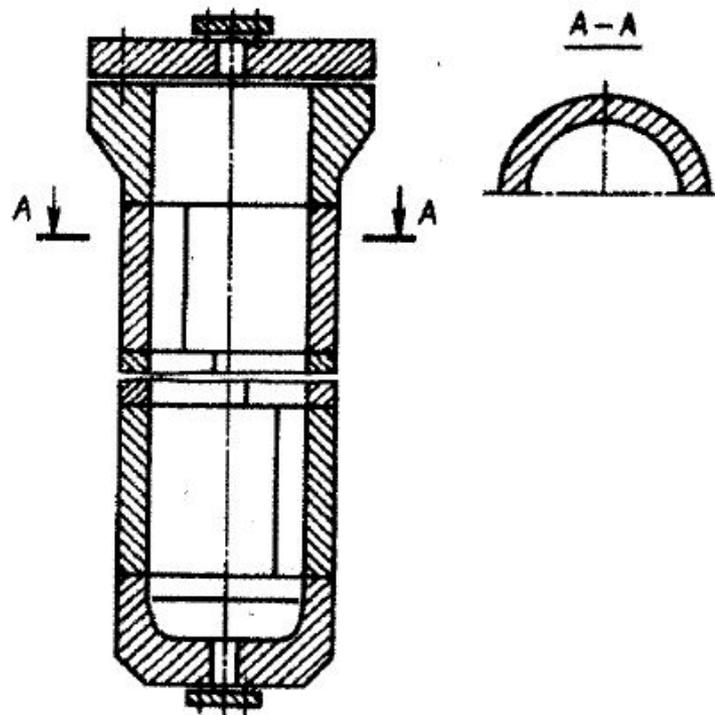


Рис. 8.3. Штамповварной СВД

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.2. Типовые конструкции аппаратов высокого давления

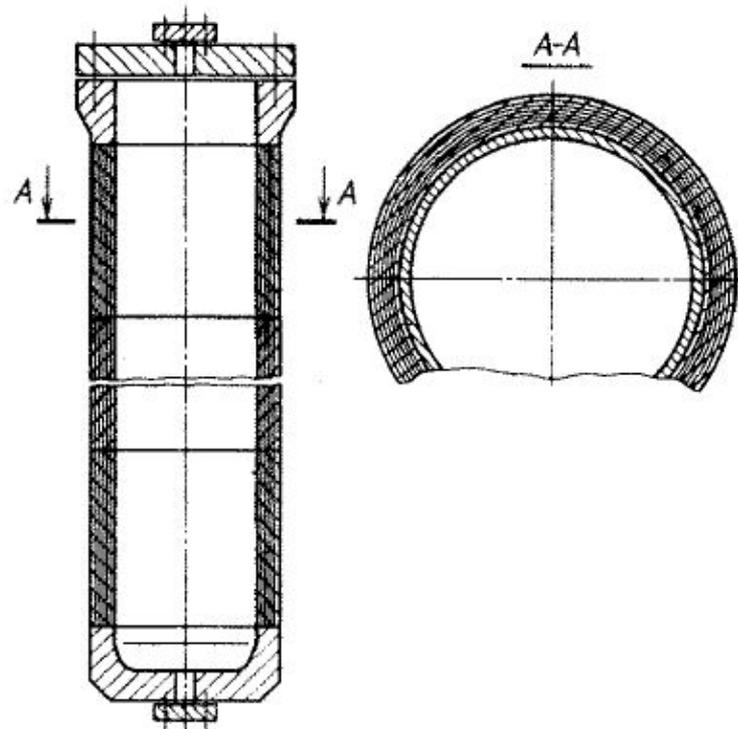


Рис. 8.4. Многослойный СВД

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.2. Типовые конструкции аппаратов высокого давления

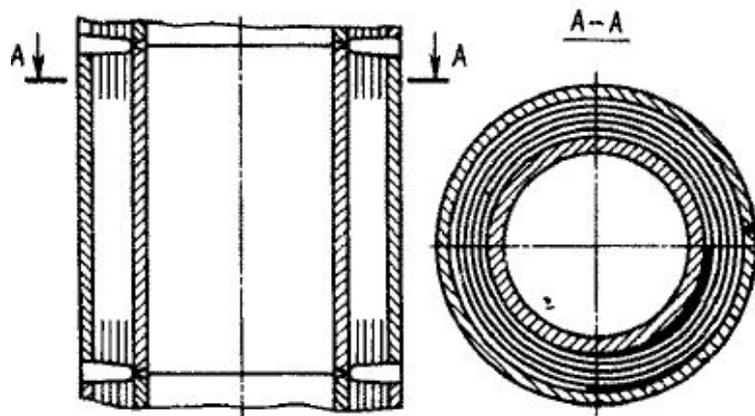


Рис. 8.5. Рулонированный СВД

Тема №6 Прочность элементов оборудования
6.2. Типовые конструкции аппаратов высокого давления

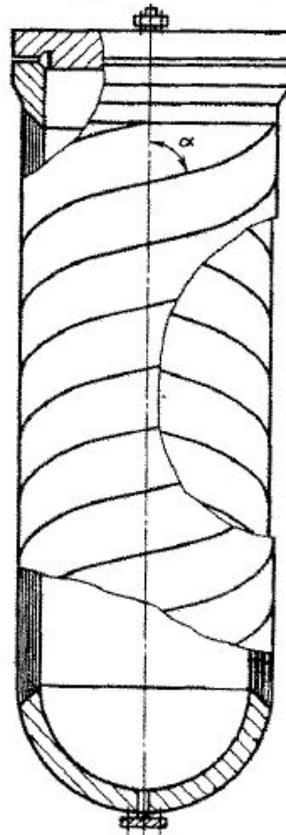


Рис. 8.6. Спиральнорулонный СВД

Тема №6 Прочность элементов оборудования
6.2. Типовые конструкции аппаратов высокого давления

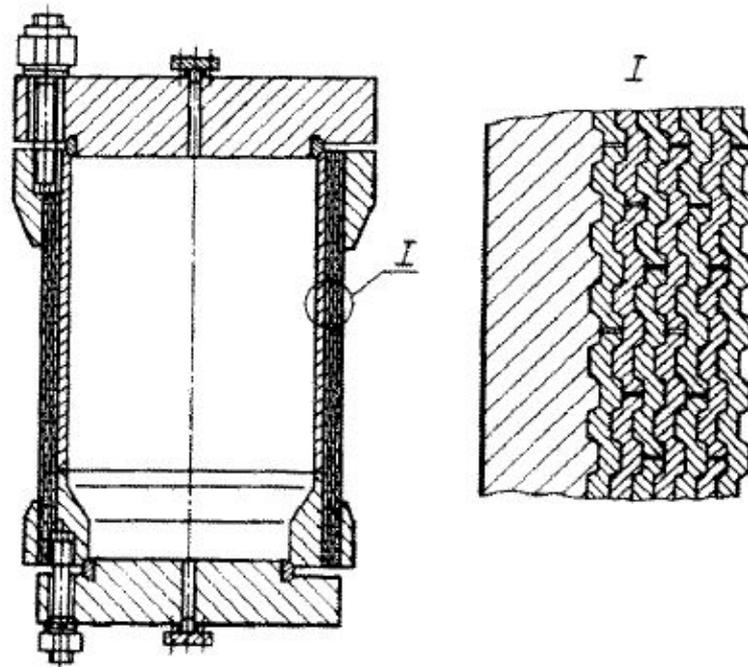
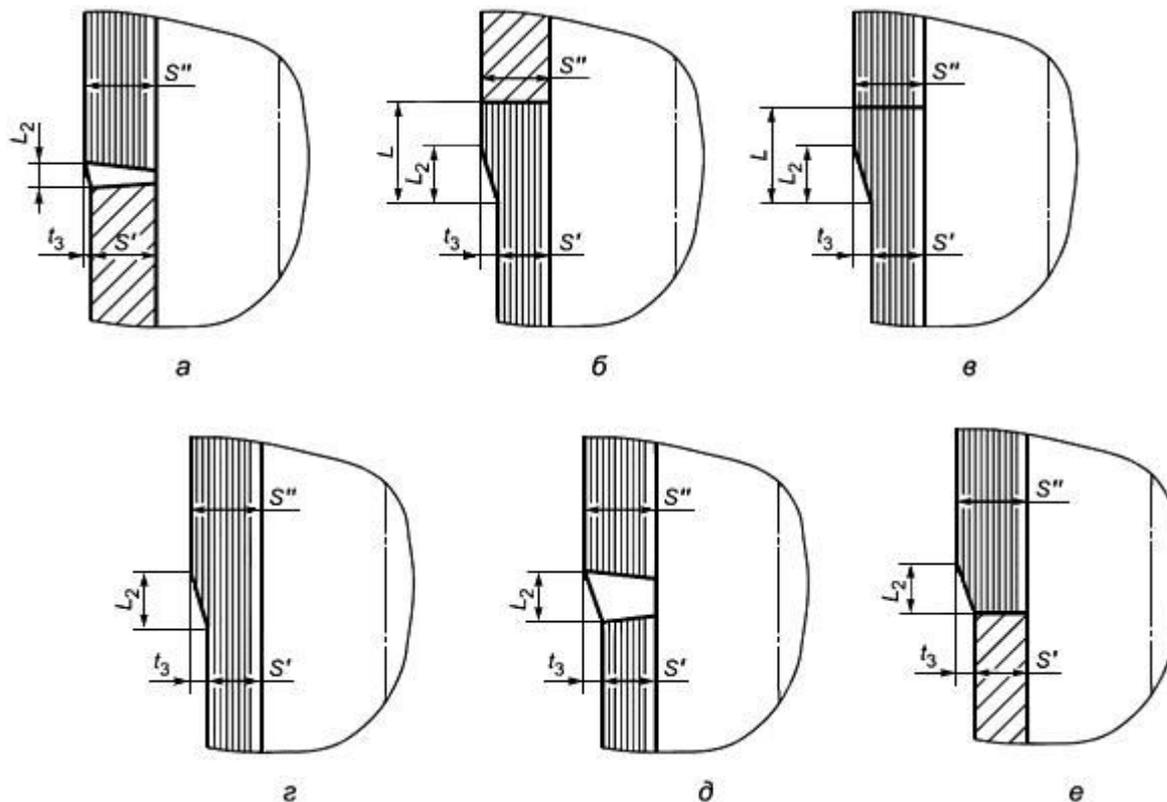


Рис. 8.7. Витой СВД

Тема №6 Прочность элементов оборудования

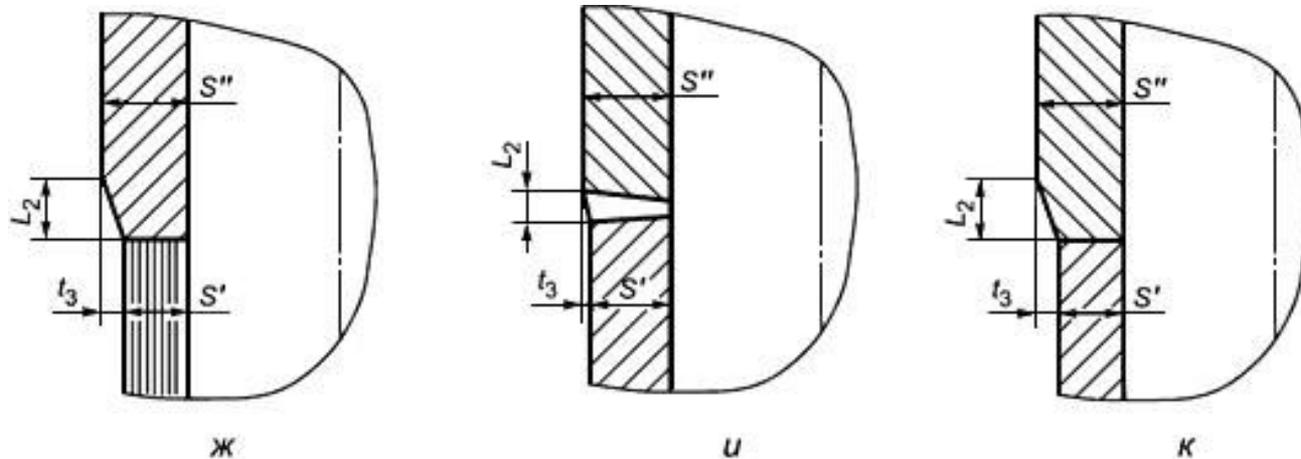
6.2. Типовые конструкции аппаратов высокого давления



Соединение цилиндрических обечаек

Тема №6 Прочность элементов оборудования

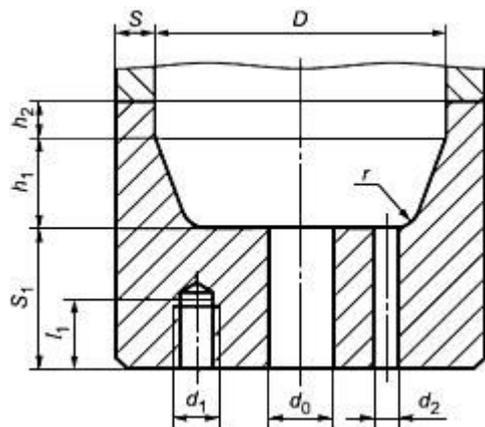
6.2. Типовые конструкции аппаратов высокого давления



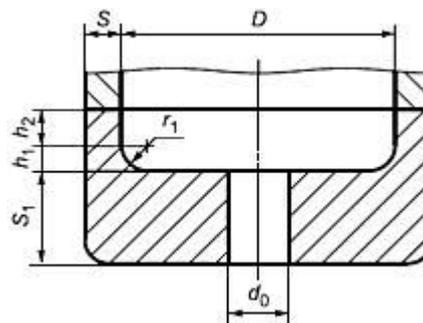
Соединение цилиндрических обечаек

Тема №6 Прочность элементов оборудования

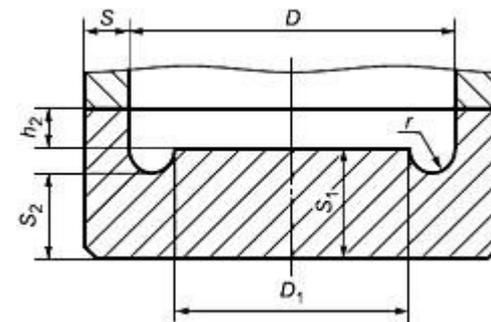
6.2. Типовые конструкции аппаратов высокого давления



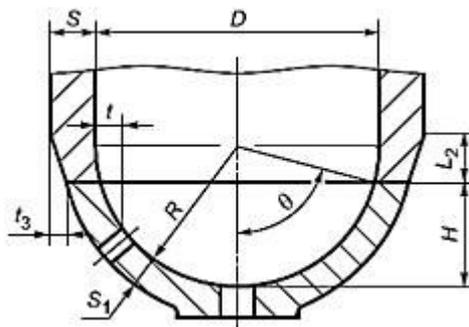
Плоское днище с коническим переходом



Плоское днище с радиусным переходом



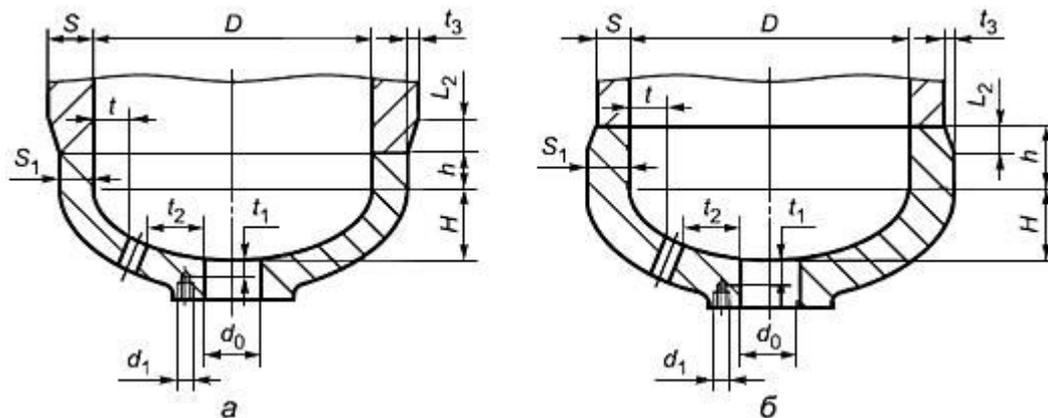
Плоское днище с проточкой



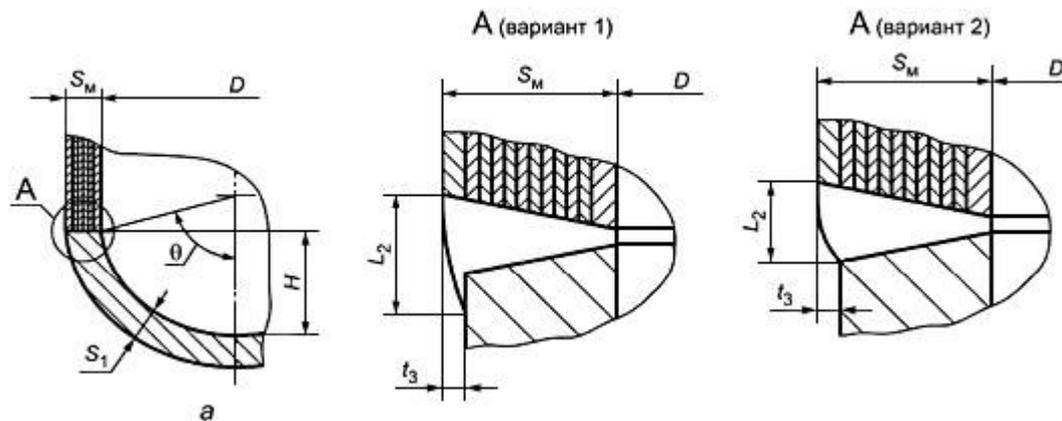
Сферическое днище

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.2. Типовые конструкции аппаратов высокого давления



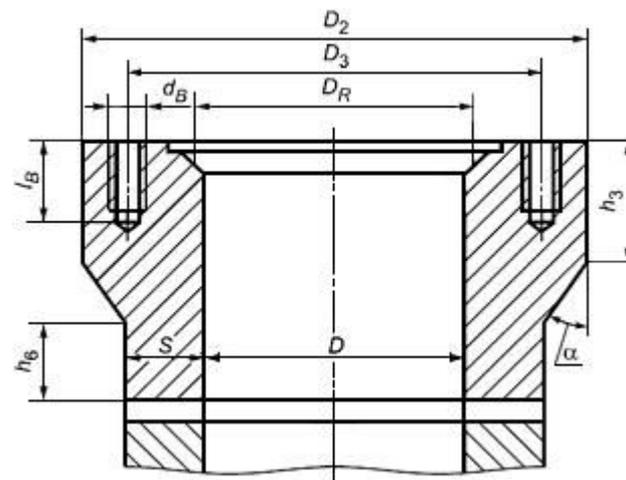
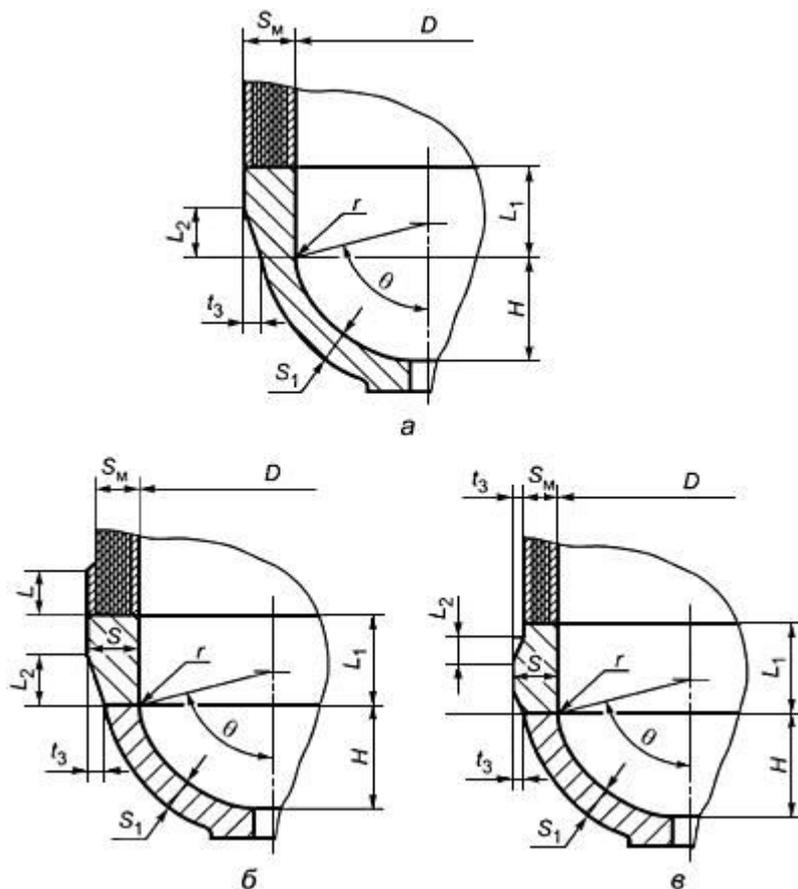
Эллиптическое днище



Выпуклые днища, сопряженные с многослойной обечайкой без вставки

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.2. Типовые конструкции аппаратов высокого давления



Кованый фланец

Сферические днища с углом сегмента $87^{\circ}75'$, сопряженные с многослойной обечайкой посредством вставки

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.2. Типовые конструкции аппаратов высокого давления

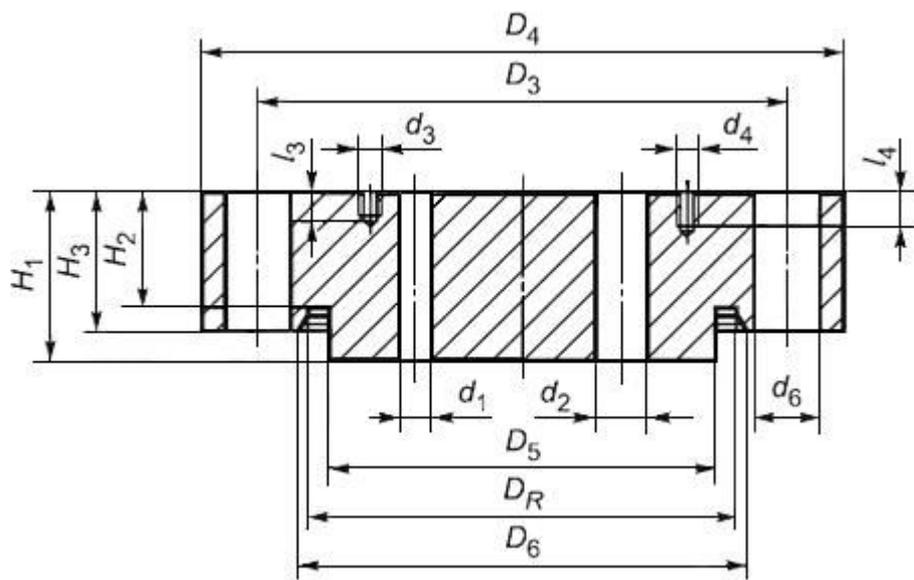
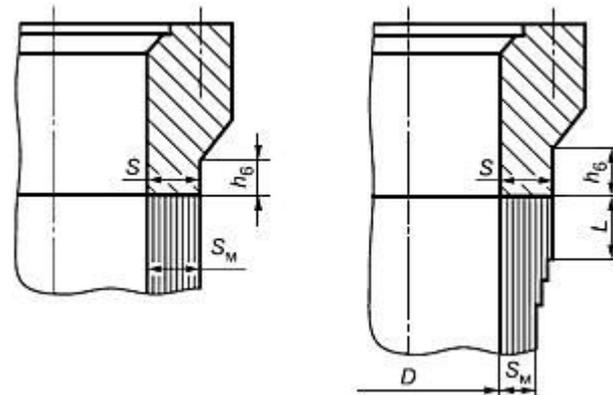


Схема плоской крышки



Кованый фланец, сопряженный с многослойной обечайкой

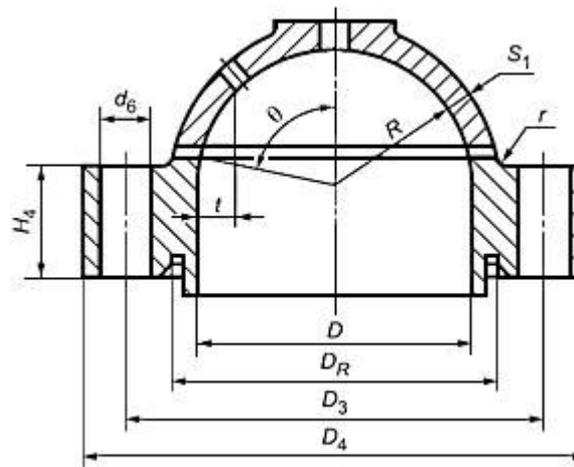


Схема конструкции выпуклой крышки

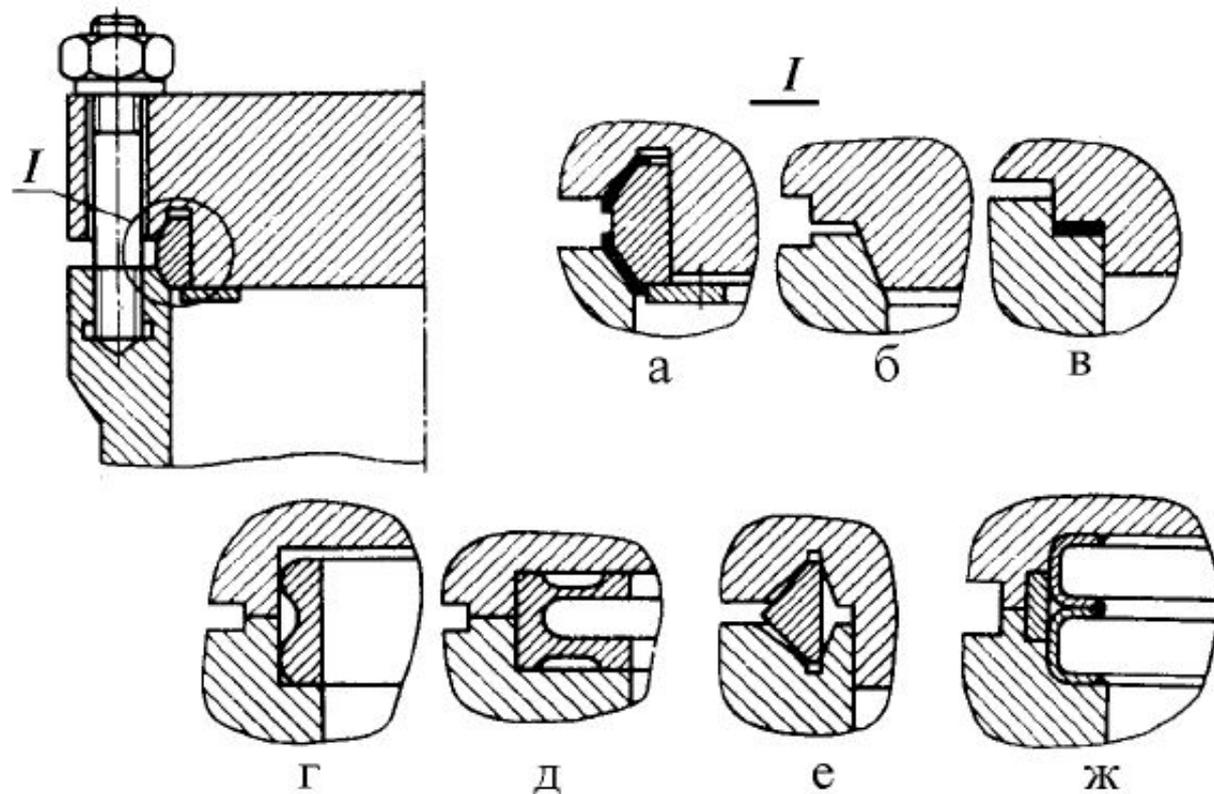


Рис. 8.21. Основные виды затворов аппаратов высокого давления:
 а – двухконусное; б – конусное; в – с плоской прокладкой;
 г и д – волнообразная прокладка; е – «дельта» -затвор; ж – мембранное уплотнение

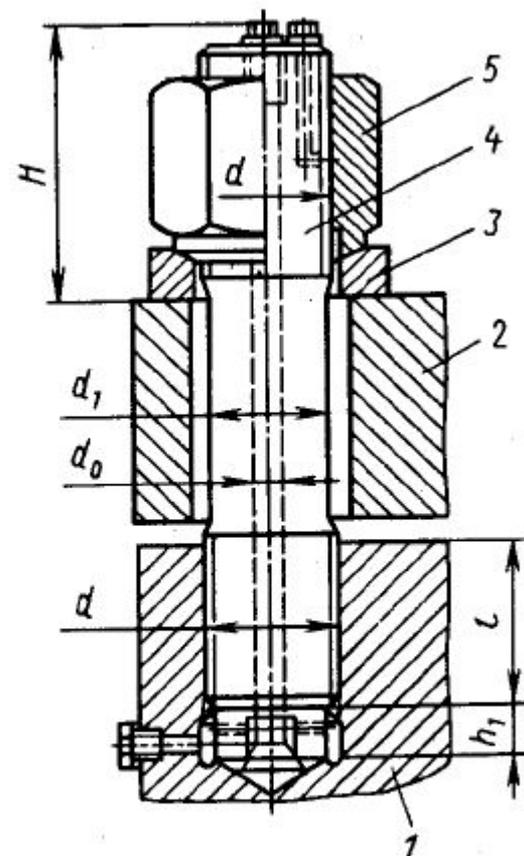
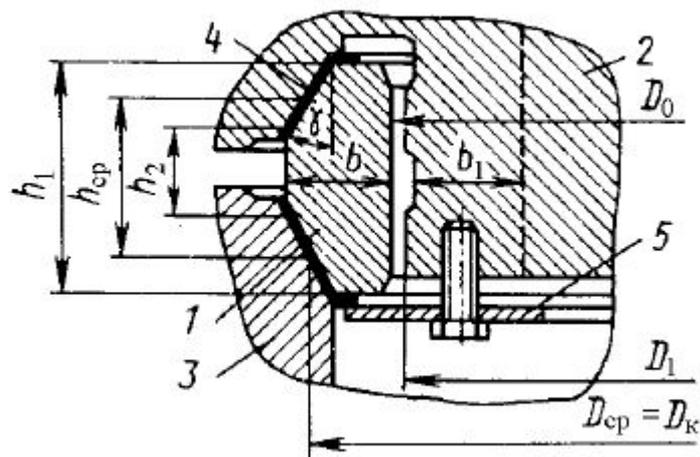
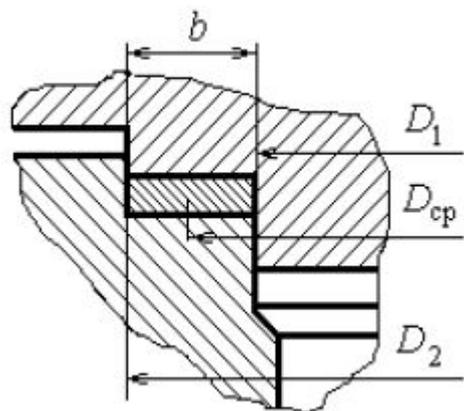


Рис. 8.24. К расчету шпилек:
 1 – фланец; 2 – крышка; 3 – шайба;
 4 – шпилька; 5 – гайка

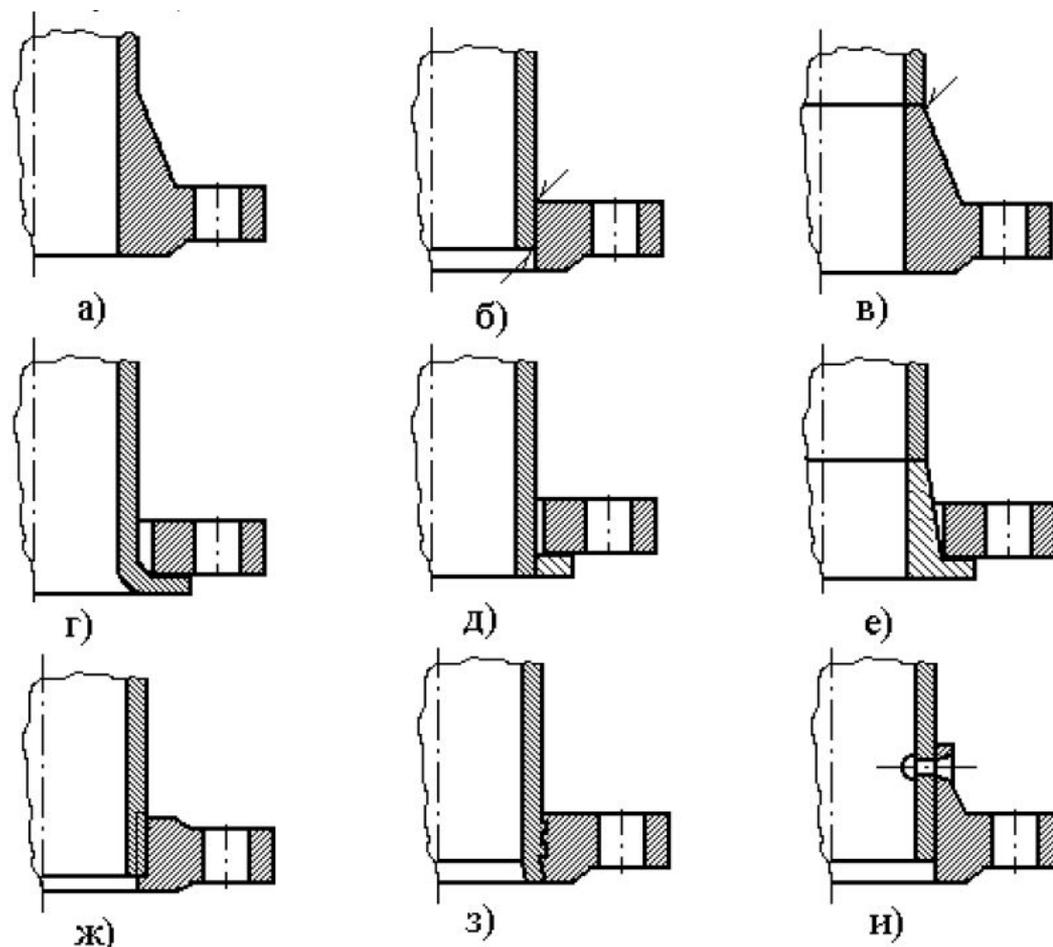


Рис. 6.1. Соединение фланца с трубой или обечайкой:
 а – цельные (литые и кованные); б – плоский приварной; в – приварной с шейкой;
 г – свободный на отбортовке; д – свободный на приварном кольце;
 е – свободный на приварном бурте; ж – на резьбе; з – на развальцовке;
 и – на клепаном соединении

1. Типы и пределы применения фланцев

Внутренний диаметр, мм	Внутреннее давление, МПа							
	Приварные встык				Плоские приварные			
	1,6	2,5	4,0	6,4	0,3	0,6	1,0	1,6
400...1600	X	X	X	X	X	X	X	X
2000...3200	X	X			X	X	X	
1600...2000	X				X	X		
3200...4000					X			

Внутренний диаметр, мм	Внутреннее давление, МПа					
	Свободные					
	на отбортовке		на кольце			
	0,3	0,6	0,3	0,6	1,0	1,6
400...1600	X	X	X	X	X	X
2000...3200	X	X	X	X	X	X
1600...2000	X		X	X	X	
3200...4000	X		X	X		

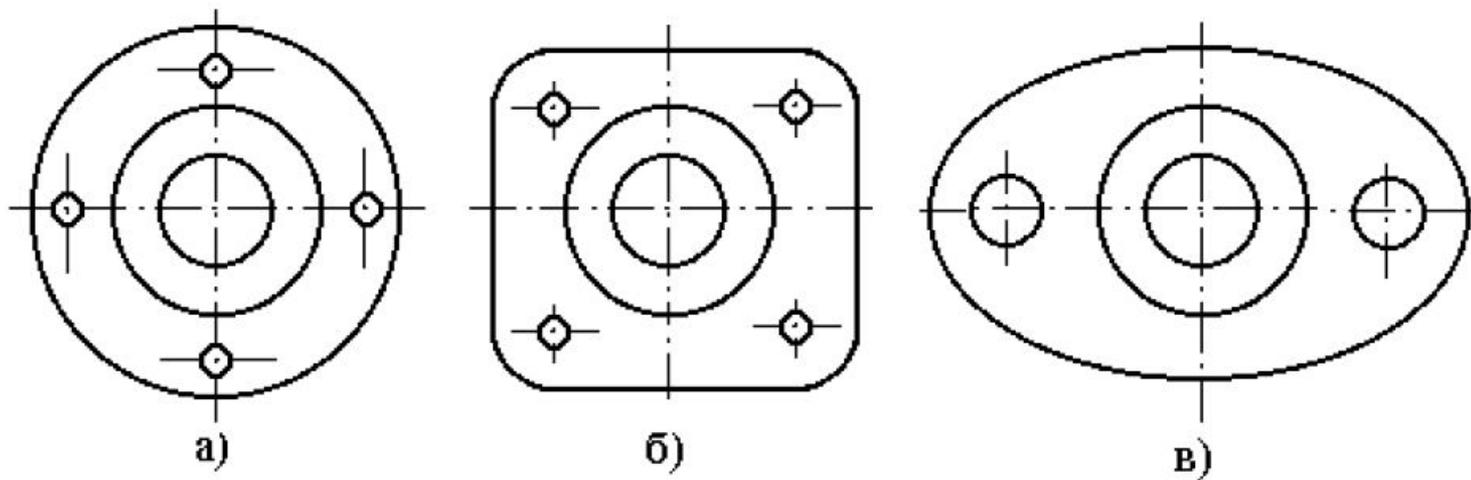


Рис. 6.2. Форма фланцев:
а – круглая; б – квадратная; в – овальная

Специальные типы фланцев

Фланцы с уплотнительной обваркой.

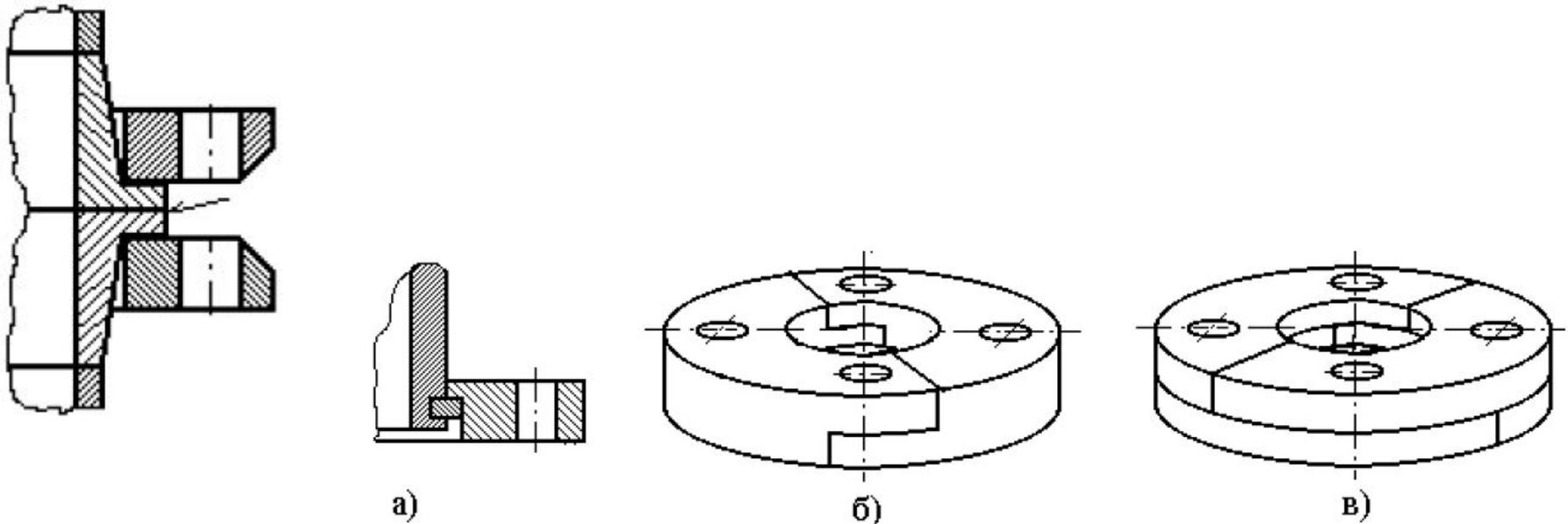


Рис. 6.5. Съемные фланцы:
а – с разрезным кольцом; б – из двух полуколец; в – из четырех полуколец

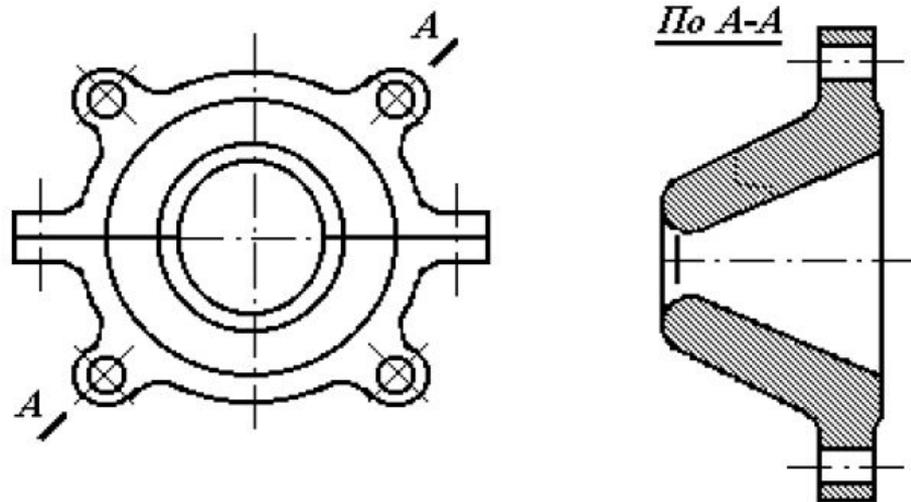


Рис. 6.6. Разъемный фланец

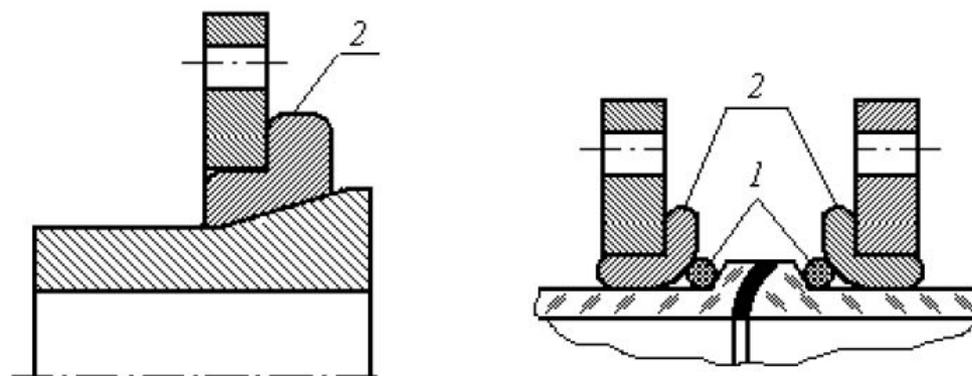


Рис. 6.7. Фланцы с разрезными кольцами:
1 – резиновые кольца; 2 - полукольца

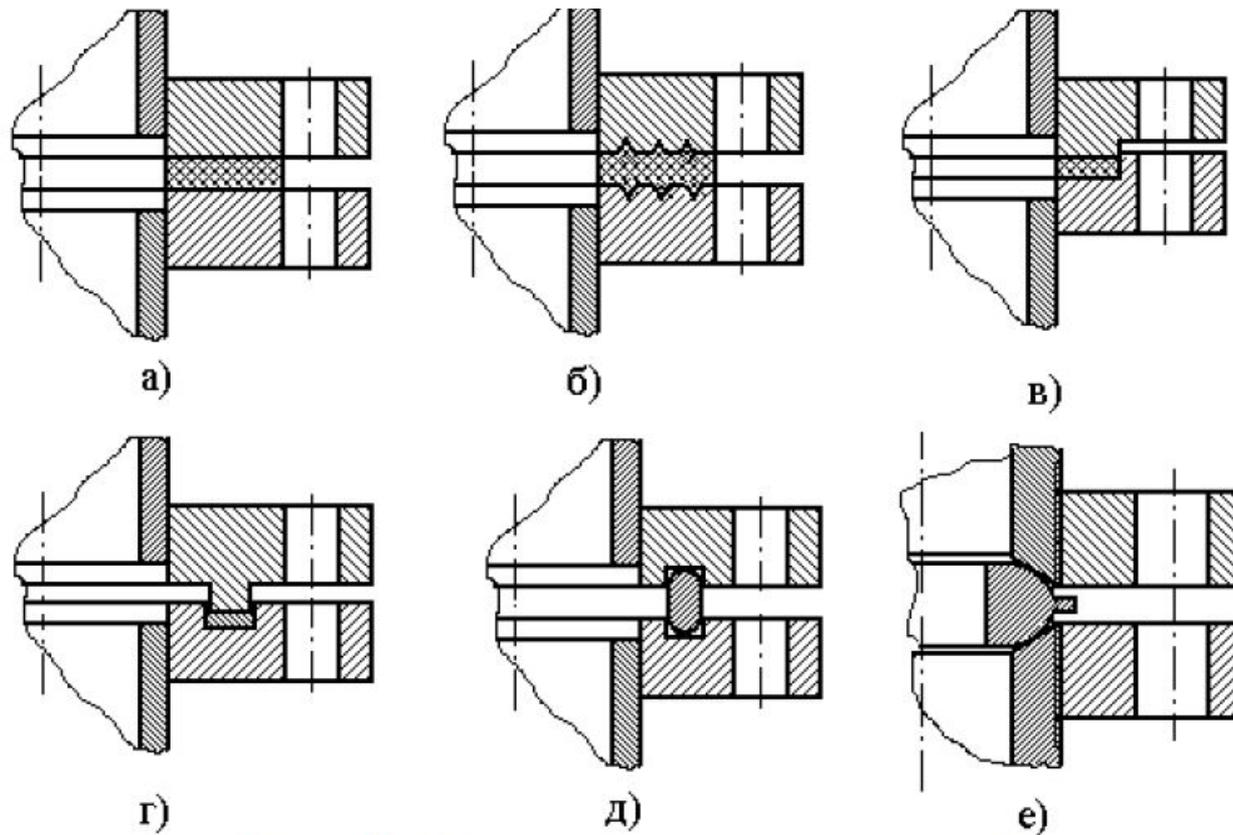


Рис. 6.11. Форма привалочных поверхностей
 а) плоская; б) плоская с рисками; в) выступ-впадина;
 г) шип-паз; д) с овальным металлическим кольцом; е) с линзой

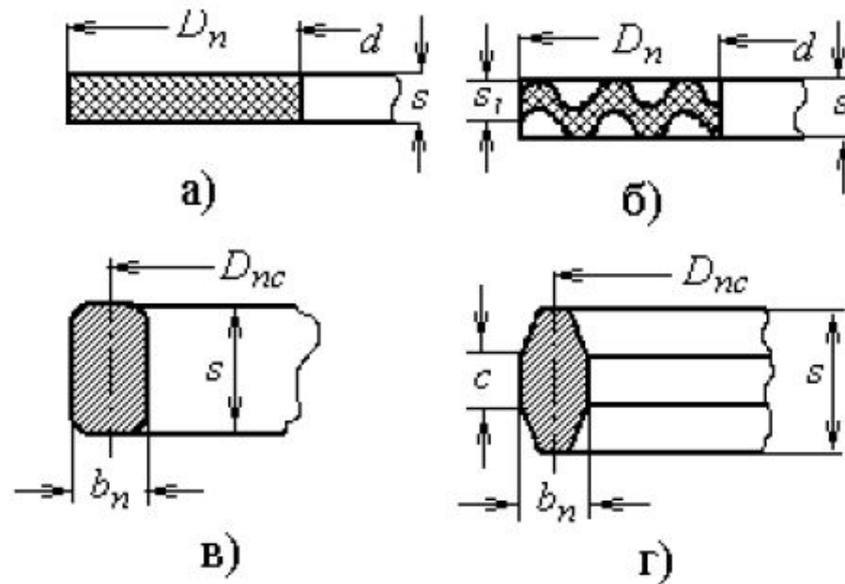


Рис 6.14. Выбор прокладки:
 а – плоская; б – гофрированная; в – овальная
 шлифованная; г – восьмиугольная

Конструкция и материал прокладки

Конструкция прокладки	Материал	p , МПа	t , °С
Плоская неметаллическая	резина	$\leq 0,6$	-30÷100
	асбестовый картон	$\leq 1,6$	до 550
	паронит	$\leq 2,5$	-200÷400
	фторопласт	не зависит	-200÷250
Плоская металлическая (шип-паз)	сталь, латунь, Al	$\geq 2,5$	-200÷300
Плоская составная	асбест в металличе- ской оболочке	$\leq 6,3$	-200÷550
Овальная и восьмиугольная	сталь	$\geq 6,3$	

Выбор ширины прокладки

Конструкция прокладки	Диаметр аппарата, мм	Ширина прокладки, мм
Плоская неметаллическая	≤ 1000	12-15
	1000-2000	15-25
	> 2000	25
Плоская составная	≤ 1600	12-18
	> 1600	18-25
Плоская металлическая	≤ 1000	10-12
	> 1000	12-15
Овальная и восьмиугольная	≤ 600	12-18
	600-800	16-22
	800-1000	18-28
	1000-1600	22-42

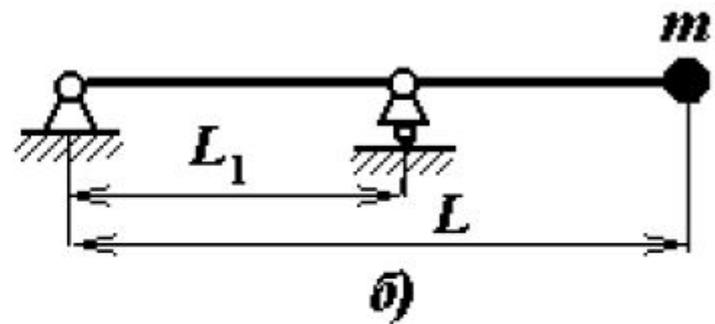
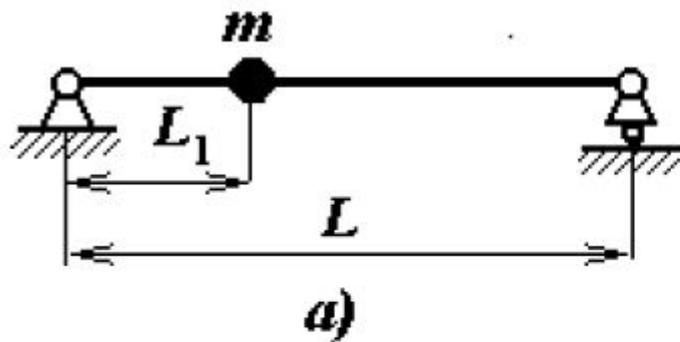
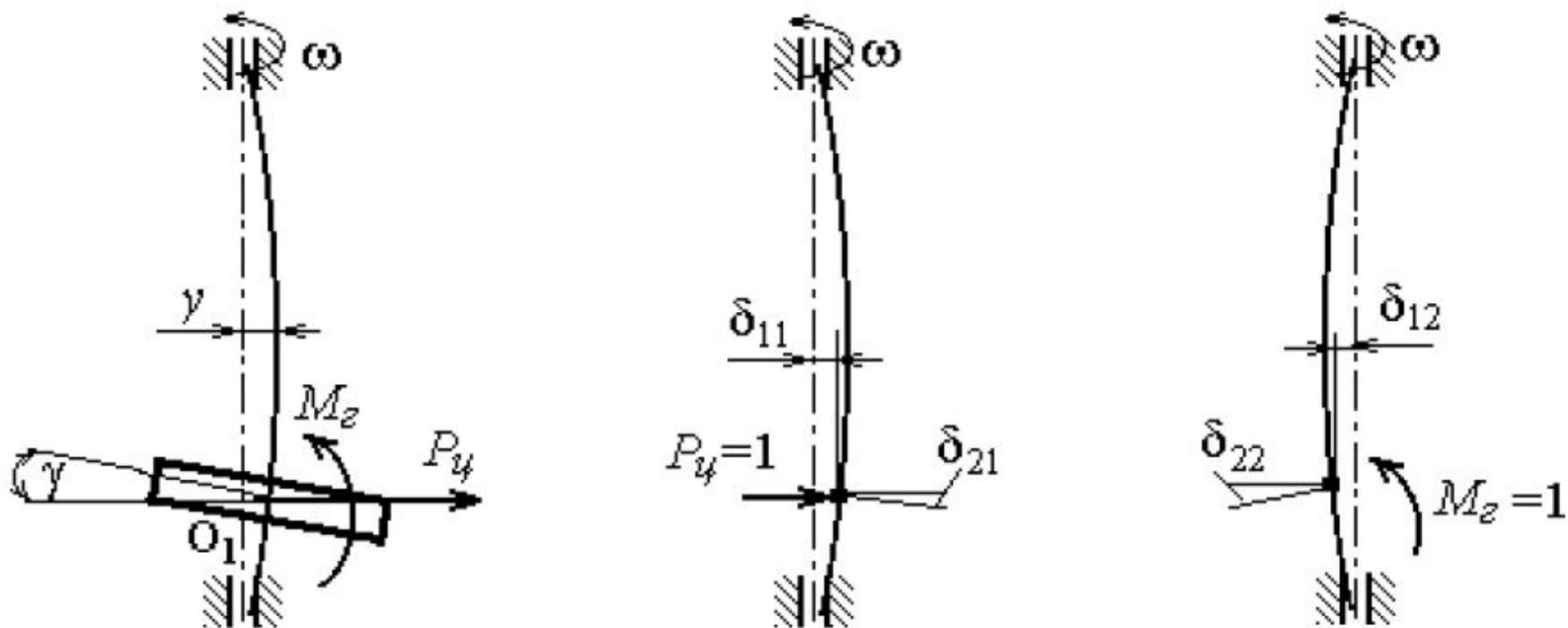


Рис. 9.1. Валы:
 а – однопролетный; б – консольный



Влияние гироскопического момента

Нормы и методы расчета при малоцикловых нагрузках (ГОСТ 25859-83)

Учитываются циклы нагружения:

- рабочий цикл между пуском и остановом аппарата;
- циклы при повторяющихся испытаниях давлением;
- циклы дополнительных усилий от воздействия крепления элементов сосуда или аппарата и крепления трубопроводов;
- циклы, вызванные стесненностью температурных деформаций при эксплуатации аппарата.

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.1.Критерии прочности и работоспособности деталей

Не учитываются циклы:

- ✓ От ветровых и сейсмических нагрузок;
- ✓ Нагрузок, возникающих при транспортировке и монтаже;
- ✓ Если размах колебания нагрузки не превышает 15% для углеродистой и 25% для аустенитной стали
- ✓ Если размах колебания разности температур в двух соседних точках ($\sqrt{2D_s}$) менее 15°C для углеродистых и 20°C для аустенитных сталей

Тема №6 Прочность элементов оборудования

6.1.Критерии прочности и работоспособности деталей

Количество нагружений от 1000 до 500000

Расчет не проводится если:

- есть положительные результаты эксплуатации аналогичного аппарата при тех же условиях работы и в течение времени не менее расчетной долговечности;
- выполняется условие $N_p \leq [N_p]$

$[N_p] = f(\Delta p/[p]; \xi \cdot \eta \cdot [\sigma])$ по номограмме

Способы повышения износостойкости и долговечности деталей

□ 1. Термические, термохимические способы:

1. **Термическая обработка деталей:** цель – создание технологических и эксплуатационных свойств детали по всему объему или только на поверхности или одновременно по всему объему и поверхности. Технологические процессы ТО различаются температурой и способом нагрева, скоростью нагрева и охлаждения, закалочной средой и способом охлаждения в закалочных средах.

2. **Термомеханическая обработка (ТМО).** При ТМО совмещаются операции обработки давлением с термической обработкой деталей или заготовок. ТМО применяется при волочении и других способах получения заготовок путем деформирования металла. При ТМО измельчается зерно и создается определенная структура сплава. В результате этого повышаются прочностные характеристики, а чувствительность сплава к надрезам снижается.

3. **Поверхностная закалка.** Ей подвергают детали из средне- и высокоуглеродистых сталей, а также из чугунов, в которых содержание связанного углерода в металлической основе составляет 0,4-0,85%. Поверхностный нагрев детали осуществляется газовым пламенем (при закалке деталей крупногабаритных и сложной формы), токами высокой частоты (увеличивает срок службы деталей примерно в 3 раза), распыленными электролитами.

Способы повышения износостойкости и долговечности деталей

- **4. Термодиффузионное (химико-термическое) упрочнение** – осуществляется в результате насыщения поверхности детали легирующими элементами, которые изменяют химический состав и структуру поверхностного слоя. Ускорение процессов диффузии обеспечивается высокотемпературным нагревом. Получение конечных микроструктур и заданных поверхностных свойств достигается дополнительной термической обработкой.
Любой процесс термодиффузии протекает в три стадии: — образование активных атомов легирующих элементов в реакционной среде, — их адсорбция на поверхности детали, — их диффузия вглубь металла. Реакционная среда, содержащая легирующий элемент, может быть газообразной, жидкой, пастообразной или порошкообразной.
 - а) **Цементация** – процесс насыщения углеродом стальных деталей. Для цементации применяют качественные углеродистые и легированные стали с содержанием углерода от 0,08% до 0,35%. Цементации подвергают детали, работающие при интенсивном износе трением, в условиях знакопеременных нагрузок, но без влияния коррозионного фактора – поршневые пальцы, кулачки распределительных валов, плунжерные пары насосов, толкатели и др.
 - б) **Азотирование (нитрирование)** – процесс насыщения азотом поверхностей стальных и чугуновых деталей. При азотировании повышается поверхностная твердость, износостойкость, предел усталости и коррозионная стойкость при работе во влажной атмосфере, паре и пресной воде. Свойства слоя сохраняются при температуре до 500 С.

Способы повышения износостойкости и долговечности деталей

- ▣ **в) Нитроцементация (цианирование)** – процесс одновременного насыщения поверхности детали углеродом и азотом. Наиболее распространена нитроцементация в среде природного газа с добавками до 15% аммиака. Процесс осуществляется по технологической схеме цементации на таком же оборудовании.
Износостойкость цианированного слоя в 2-3 раза выше, чем у цементированного. Пластические свойства цианированного слоя выше, чем у азотированного. Нитроцементацией упрочняют валы, оси. Зубчатые колеса, втулки, болты, гайки.
- г) **Силицирование** – процесс насыщения кремнием низко- и среднеуглеродистых сталей, ковких и высокопрочных чугунов. Силицирование применяется для повышения коррозионной стойкости углеродистых сплавов и замены ими легированных сплавов. Силицированием защищают от коррозии клапаны и детали судовой арматуры, валики роторов насосов и крылатки, болты и гайки.
- д) **Алитирование** – насыщение поверхностей деталей алюминием. После алитирования повышаются жаростойкость, окалино – и коррозионная стойкость в атмосфере. Алитирование применяется для лопаток газовых турбин, выхлопных коллекторов ДВС, деталей форсунок паровых котлов, клапанов, кожухов паро- и воздухонагревателей.
- е) **Сульфидирование (сульфоцианирование)** – насыщение поверхности детали серой и серой с азотом. Процессы применяются после окончательной механической обработки для поверхностей трения деталей, изготовленных из сталей, чугунов, бронз, латуней и баббитов. Износостойкость повышается не за счет увеличения твердости, а благодаря образованию пленок сульфидных химических соединений, предотвращающих прямой контакт трущихся поверхностей и выполняющих роль смазки.
- ж) **Диффузионное хромирование** — На поверхности детали образуется химически стойкий, прочный при высоких температурах слой, состоящий из сложных карбидов. При содержании в поверхностном слое хрома около 50% резко повышается коррозионная стойкость. Недостаток способа: необходимость создания высоких температур (1000-13000 С). Применяется для повышения износостойкости поршневых колец, деталей топливной аппаратуры, паровой арматуры.

Способы повышения износостойкости и долговечности деталей

- **5. Термохимическое упрочнение** – деталь обмазывается энерговывделяющими термитными пастами. Термитная смесь состоит из кислородосодержащих веществ и порошков алюминия, магния, железа, кальция и связующего вещества. После поджигания смеси на поверхности детали развиваются температуры до 600-800 С. В результате реакции, легирующий элемент диффундирует в поверхность детали.
- **2. Электрохимические и электрофизические способы:**
 - 1. Гальванические способы упрочнения.**
 - а) **Твердое никелирование** – позволяет восстановить размеры деталей и повысить износостойкость. Толщина покрытий достигает 2 мм. После отжига покрытия при температуре 300-400 С в течение 1 часа микротвердость находится в пределах Н 750-900. Процесс никелирования применяется для упрочнения коленчатых валов, поршневых пальцев, поршней и втулок гидравлических машин.
 - б) **Электролитическое фосфатирование** – производят после окончательной механической обработки. В зависимости от назначения толщину пленки получают от 0,002 до 0,016 мм и более. Фосфатные пленки облегчают процессы приработки деталей и повышают противозадирные свойства.
 - в) **Эмалирование** – процесс получения электролитическим путем плотных защитно-декоративных эмалевидных пленок толщиной 0,01-0,12 мм. Эмалевый слой стоек в органических растворителях и кислотах, минеральных маслах и мылах. Слой не растрескивается при ударных и сжимающих нагрузках и выдерживает нагрев до температуры 300С. Твердые эмалиро-ванные покрытия получают на алюминии в электролитах, состоящих из растворов щавелевой, борной и лимонной кислот.

Способы повышения износостойкости и долговечности деталей

- г) **Электролитическое лужение и свинцевание** – для коррозионной защиты деталей, облегчения процессов пайки деталей и снижения сопротивления в контактах электропередающих устройств. Лужение производится в кислых и щелочных электролитах, а свинцевание – в борфтористоводородных, кремнийфтористоводородных и щелочных электролитах.

2. Химические способы нанесения покрытия. Используются для повышения долговечности и надежности деталей гидравлических машин, аппаратов. Поверхность детали проходит предварительную обработку, достигается определенная чистота обработки, производится обезжиривание и протравливание. Затем деталь погружается в ванну с раствором, содержащим необходимый элемент, который оседает на поверхности детали. Получение заданных свойств достигается последующей химической обработкой.

3. Электроискровое упрочнение. При электроискровом или электроимпульсном разряде в цепи постоянного тока происходит перенос материала анода на катод. Деталь включается в цепь в качестве катода, анодом служит инструмент из упрочняющего материала. В процессе разряда происходят оплавление тонкого слоя детали, легирование этого слоя перенесенным материалом анода, диффузия легирующего материала под этот слой и наплавка на него материала. В результате быстрого охлаждения происходит термическое упрочнение.

Способы повышения износостойкости и долговечности деталей

- ▣ **4. Электроконтактное упрочнение.** За счет переноса легирующего материала, процесса его диффузии и закалки, образуется упрочненный поверхностный слой. Для электроконтактного упрочнения необходимы рабочие токи 300-1500А при напряжении 3-6 В.
- ▣ **3. Механическое упрочнение поверхностей деталей.**
 1. **Пластическое деформирование** – происходит изменение формы кристаллов и измельчение зерен сплава. Изменяются физико- механические свойства поверхностного слоя, повышается твердость, прочность, коррозионно-усталостная прочность, контактная выносливость и износостойкость.
Упрочнение поверхности деталей наклепом осуществляется обдувкой стальной или чугунной дробью, обкаткой шариками и роликами, алмазным выглаживанием, виброобкатыванием и чеканкой, центробежным (динамическим) движением шариков и гидроабразивным полированием. Во всех процессах используются смазочно-охлаждающие жидкости для уменьшения трения и облегчения деформации.
 2. **Дробеструйная обработка** – проводится на пневматических или центробежных дробометах. Пневматические дробометы используются для обработки внутренних поверхностей или деталей сложной формы (спиральных пружин). Применение стальной дроби дает лучшие результаты, чем чугунной.
Сочетание предварительной упрочняющей термической или химико-термической обработки с обдувкой дробью увеличивает срок службы сварных швов в 3 раза, коленчатых валов – в 9 раз.

Способы повышения износостойкости и долговечности деталей

- **3. Обкатка роликами и шариками** — производится на токарных станках (цилиндрические поверхности) и строгальных (плоские поверхности). Форма поверхности ролика влияет на степень и качество наклепа. Уменьшение диаметра ролика и радиуса скругления контактной поверхности повышают глубину и степень наклепа. Использование шарика вместо ролика заменяет трение качения на трение качения и верчения. Качество обработки улучшается, время обкатки сокращается.
- **4. Вибрационная обработка.** Кроме упрочнения создает определенный микрорельеф поверхности, который улучшает условия смазки в поверхностях трения. Повышается износостойкость. Упрочняющий инструмент может иметь вибрацию в одном, двух направлениях или совершать комбинированное движение. Способ используется для упрочнения и создания микрорельефа в поверхностях подшипников и цилиндрических втулок ДВС.
- **5. Алмазное упрочнение и выглаживание.** Инструмент – кристалл алмаза, имеющий сферическую рабочую часть. Алмаз заделан в оправку. Усилие прижима создается тарированной пружиной. Шлифование создает в поверхностном слое остаточные растягивающие напряжения, которые компенсируются сжимающими напряжениями после алмазного выглаживания.
- **6. Дорнование** – применяется для упрочнения и повышения точности и чистоты обработки внутренних поверхностей деталей. Суть процесса заключается в проталкивании или протягивании специальной оправки (дорна) или шарика через отверстие. Качество обработки зависит от величины натяга между инструментом и поверхностью детали. Скорость перемещения инструмента составляет 0,04-0,12 м/с.