

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН РАДИАЛЬНОГО И ОСЕВОГО НАТЯГОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ БЛОК-МАТРИЦЫ АППАРАТА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

<sup>1</sup> Дудяк А.И., <sup>1</sup> Хвасько В.М.

<sup>1</sup> УО «Белорусский национальный технический университет», Минск

Наиболее нагруженной частью аппарата высокого давления являются матрицы, которые находятся в условиях всестороннего неравномерного сжатия. Так как матрицы аппаратов высокого давления изготавливаются из твердого сплава марки ВК-6, то с целью получения в них условий всестороннего сжатия необходимо создать как можно большее контактное давление по их боковой поверхности. Этому можно добиться за счет запрессовки матриц в блок стальных колец, а также за счет деформации этих матриц в радиальном направлении в процессе их нагружения [1].

Рассмотрим толстостенный цилиндр, состоящий из двух колец, выполненных из одинакового материала. Такой цилиндр чаще всего изготавливают путем запрессовки внутреннего цилиндра в наружный по конусной поверхности. Осевой разрез такого цилиндра показан на рисунке 1. Обозначим величину радиального натяга –  $\frac{\delta}{2}$ , величину осевого натяга –  $h$ .

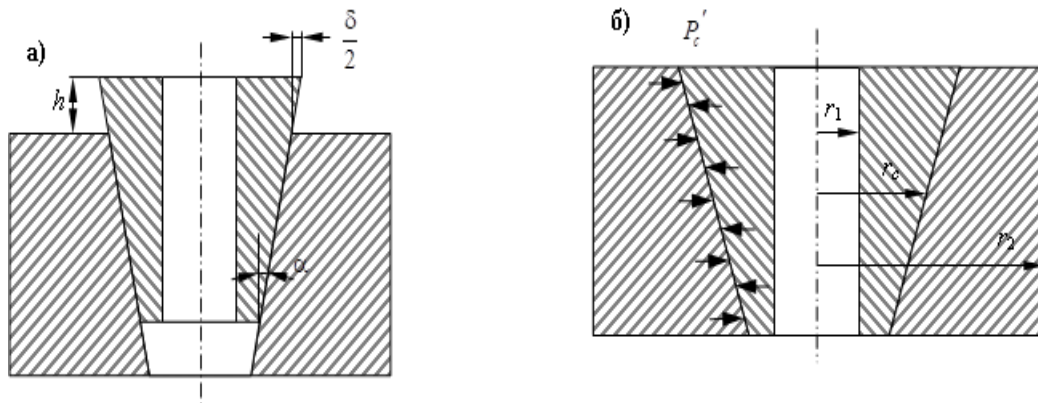


Рис. 1. Осевое сечение составного цилиндра: а) до сборки; б) после сборки

Угол конусности поверхностей контактов цилиндров находится в пределах  $1^{\circ}30' \div 1^{\circ}50'$ . Запрессовка внутреннего цилиндра в наружный производится с помощью прессов требуемого усилия.

Величина радиального натяга представляет собой разность до запрессовки между наружным радиусом внутреннего цилиндра и внутренним радиусом наружного цилиндра.

Так как величина  $\frac{\delta}{2}$  весьма мала, то «подгонка» конусных поверхностей производится по величине осевого натяга, который определяется из выражения:

$$h = \frac{\frac{\delta}{2}}{\operatorname{tg}\alpha}. \quad (1)$$

После запрессовки цилиндров друг в друга наружный радиус внутреннего цилиндра и внутренний радиус наружного цилиндра становятся одинаковыми. В связи

с деформацией цилиндров в зоне их сопряжения возникают контактные давления, которые можно определить из соотношения [1]:

$$P_c' = \frac{\frac{\delta}{2}}{\frac{r_c}{E} \left[ \frac{1+k_1^2}{1-k_1^2} + \frac{1+k_2^2}{1-k_2^2} \right]}. \quad (2)$$

где  $E$  – модуль продольной упругости материала колец;

величины  $k_1^2 = \frac{r_1^2}{r_c^2}$ ,  $k_2^2 = \frac{r_c^2}{r_2^2}$ .

Выражение для определения давления в зоне контакта цилиндров может быть представлено в следующем виде [2]:

$$P_c'' = \sigma_{\text{мц}} \cdot \frac{r_2^2 - r_c^2}{2r_2^2}. \quad (3)$$

Тогда полное контактное давление  $P_c$  можно определить как сумму контактного давления  $P_c'$  от запрессовки цилиндров друг в друга и контактного давления  $P_c''$ , возникающего в результате деформации зоны контакта от создания давления  $P_1$  внутри собранного блока цилиндров:

$$P_c = P_c' + P_c''. \quad (4)$$

Очень важно определить величину контактного давления от запрессовки цилиндров друг в друга. Вычислив значение данного контактного давления, находят величину осевого натяга, а затем осуществляют «подгонку» цилиндров друг к другу.

Контактное давление  $P_c''$  равно радиальному напряжению в зоне контакта, величину которого можно определить из выражения вида [1]:

$$\sigma_r = \frac{P_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{P_1 r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r_c^2} = P_c'',$$

или

$$\sigma_r = \frac{P_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left( 1 - \frac{r_2^2}{r_c^2} \right) = P_c''. \quad (5)$$

Используя выражения (3) и (5), согласно формуле (4) получим значение величины  $P_c'$ :

$$P_c' = P_c - P_c'' = \sigma_{\text{мц}} \frac{r_2^2 - r_c^2}{2r_2^2} - \frac{P_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left( 1 - \frac{r_2^2}{r_c^2} \right). \quad (6)$$

Рассматривая совместно соотношения (2) и (6), определим величину радиального натяга, которую нужно создать предварительной запрессовкой колец друг в друга:

$$\frac{\delta}{2} = \frac{r_c}{E} \left[ \frac{1+k_1^2}{1-k_1^2} + \frac{1+k_2^2}{1-k_2^2} \right] \cdot \left[ \sigma_{\text{мц}} \frac{r_2^2 - r_c^2}{2r_2^2} - \frac{P_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left( 1 - \frac{r_2^2}{r_c^2} \right) \right]. \quad (7)$$

Вычислив значение радиального натяга согласно формуле (7), можно найти глубину запрессовки  $h$  внутреннего кольца в наружное из выражения (1).

Для прессов усилием 5000 кН используют блок-матрицы, состоящие из трех колец, изготовленных из стали 35ХГСА, и центральной матрицы, выполненной из твердого сплава марки ВК-6. Схема такой блок-матрицы показана на рисунке 2.

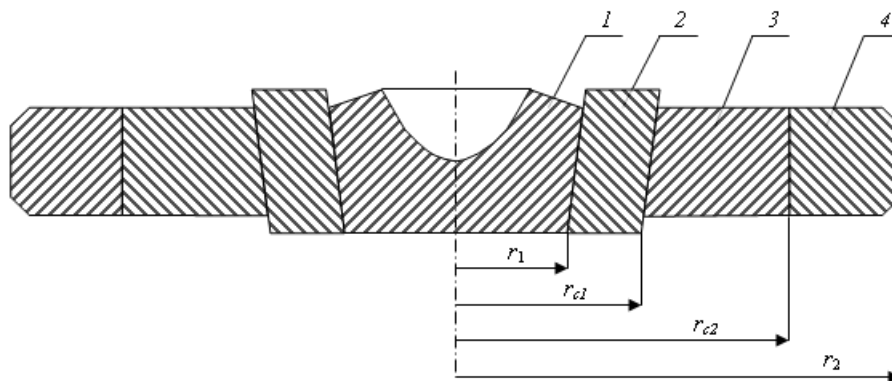


Рис. 2. Осевое сечение блок-матрицы аппарата высокого давления

Изготовление блок-матрицы (рис. 2) осуществляется следующим образом. В наружное кольцо 4 запрессовывается кольцо 3. Затем в блок колец запрессовывается внутреннее кольцо 2. В полностью собранный блок из трех колец запрессовывается твердосплавная матрица 1.

В практике конструктивно задаются размеры матрицы и диаметр наружного кольца, который определяется размером гнезда пресса. Для прессов марки ДО137 усилием 5000 кН диаметр матрицы колеблется в пределах 38÷42 мм, диаметр наружного кольца составляет 150 мм. Для материала колец – стали 35ХГСА: предел пропорциональности  $\sigma_{\text{мц}}=1100$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu=0,22$ ; модуль продольной упругости  $E=2,1 \cdot 10^5$  МПа. Для твердого сплава ВК-6: предел прочности на сжатие  $[\sigma]_{\text{с}}=4500$  МПа; предел прочности на растяжение  $[\sigma]_{\text{р}}=1150$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu=0,18$ ; модуль продольной упругости  $E=6,8 \cdot 10^5$  МПа.

Рассмотрим случай, когда диаметр матрицы равен 40 мм и диаметр наружного кольца – 150 мм, а соответствующие радиусы колец равны 20 и 75 мм.

Ранее аналитическим путем были получены формулы для определения радиусов контактов поверхностей для составного цилиндра [3], согласно которым получим:

$$r_{c2} = \sqrt[3]{r_1 \cdot r_2^2} = \sqrt[3]{20 \cdot 75^2} = 48,27 \text{ мм};$$

$$r_{c1} = \sqrt{r_1 \cdot r_{c2}} = \sqrt{20 \cdot 48,27} = 31,07 \text{ мм}.$$

Из выражений для определения эквивалентных напряжений в характерных зонах отдельных цилиндров составной конструкции найдем величины контактных давлений в зоне радиусами  $r_{c2}$  и  $r_{c1}$  [3]:

$$P_{c2} = \sigma_{\text{мц}} \frac{r_2^2 - r_{c2}^2}{2r_2^2} = 1100 \cdot \frac{75^2 - 48,27^2}{2 \cdot 75^2} = 322,2 \text{ МПа};$$

$$P_{c1} = P_{c2} + \sigma_{\text{мц}} \frac{r_{c2}^2 - r_{c1}^2}{2r_{c2}^2} = 322,2 + 1100 \cdot \frac{48,27^2 - 31,07^2}{2 \cdot 48,27^2} = 644,3 \text{ МПа}.$$

В этом случае максимальное значение контактного давления на боковую поверхность матрицы согласно [3]:

$$P_1 = P_{c1} + \sigma_{\text{мц}} \frac{r_{c1}^2 - r_1^2}{2r_{c1}^2} = 644,3 + 1100 \cdot \frac{31,07^2 - 20^2}{2 \cdot 31,07^2} = 966,4 \text{ МПа}.$$

Очевидно, что при запрессовке внутреннего кольца в блок из наружного и среднего стальных колец, в зоне их контакта происходит радиальная деформация. При этом радиальное напряжение в зоне контакта можно представить в следующем виде [4]:

$$\sigma_{rc2}' = \frac{P_{c1}r_{c1}^2}{r_2^2 - r_{c1}^2} - \frac{P_{c1}r_{c1}^2r_2^2}{r_2^2 - r_{c1}^2} \cdot \frac{1}{r_{c2}^2} = \frac{P_{c1}r_{c1}^2}{r_2^2 - r_{c1}^2} \left( 1 - \frac{r_2^2}{r_{c2}^2} \right).$$

Подставив в последнее равенство все найденные ранее величины, получим:

$$\sigma_{rc2}' = \frac{644,31 \cdot 31,07^2}{75^2 - 31,07^2} \left( 1 - \frac{75^2}{48,27^2} \right) = -188,8 \text{ МПа.}$$

Аналогично получим выражение для радиального напряжения  $\sigma_{rc2}''$ , возникающего от запрессовки твердосплавной матрицы в блок стальных колец, состоящий из трех запрессованных друг в друга отдельных колец [4]:

$$\sigma_{rc2}'' = \frac{P_1r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{P_1r_1^2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r_{c2}^2} = \frac{P_1r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left( 1 - \frac{r_2^2}{r_{c2}^2} \right).$$

Подставив в полученное выражение все вычисленные значения величин, получим:

$$\sigma_{rc2}'' = \frac{966,41 \cdot 20^2}{75^2 - 20^2} \left( 1 - \frac{75^2}{48,27^2} \right) = -104,6 \text{ МПа.}$$

Аналогично формуле (4) полное контактное давление в зоне сопряжения наружного и среднего колец можно представить в виде следующей суммы:

$$P_{c2} = P_{c2}' + \sigma_{rc2}' + \sigma_{rc2}'',$$

где  $P_{c2}'$  - контактное давление, возникающее от запрессовки среднего кольца в наружное.

Из последнего равенства очевидно, что величина этого давления равна:

$$P_{c2}' = P_{c2} - \sigma_{rc2}' - \sigma_{rc2}'' = 322,18 - |-188,8| - |-104,6| = 28,8 \text{ МПа.}$$

Используя выражение (2), определим значение радиального натяга при запрессовке среднего кольца в наружное:

$$\frac{\delta_2}{2} = P_{c2}' \cdot \frac{r_{c2}}{E} \left[ \frac{1+k_1^2}{1-k_1^2} + \frac{1+k_2^2}{1-k_2^2} \right],$$

где  $k_1^2 = \frac{r_{c1}^2}{r_{c2}^2} = \frac{31,07^2}{48,27^2} = 0,414$ ;  $k_2^2 = \frac{r_{c2}^2}{r_2^2} = \frac{48,27^2}{75^2} = 0,414$ .

Тогда  $\frac{\delta_2}{2} = 28,78 \cdot \frac{48,27}{2,1 \cdot 10^5} \left[ \frac{1+0,414}{1-0,414} + \frac{1+0,414}{1-0,414} \right] = 0,032 \text{ мм.}$

Обычно при запрессовке колец друг в друга и матрицы в блок стальных колец, угол конусности  $\alpha$  составляет  $1^\circ 30'$ . В этом случае  $\text{tg}1^\circ 30' = 0,0262$ . Используя выражение (1), определим осевой натяг  $h_2$ :

$$h_2 = \frac{0,032}{0,0262} = 1,22 \text{ мм.}$$

При запрессовке твердосплавной матрицы в блок стальных колец, происходит деформация в радиальном направлении слоев контакта внутреннего и среднего колец. Радиальное напряжение в зоне контакта можно представить в виде [4]:

$$\sigma_{rc1} = \frac{P_1r_1^2}{r_2^2 - r_{c1}^2} - \frac{P_1r_1^2r_2^2}{r_2^2 - r_{c1}^2} \cdot \frac{1}{r_{c1}^2} = \frac{P_1r_1^2}{r_2^2 - r_{c1}^2} \left( 1 - \frac{r_2^2}{r_{c1}^2} \right).$$

Подставив все известные величины в последнее выражение, получим:

$$\sigma_{rc1} = \frac{966,41 \cdot 20^2}{75^2 - 20^2} \left( 1 - \frac{75^2}{31,07^2} \right) = -357,1 \text{ МПа.}$$

Полное контактное давление в зоне контакта внутреннего кольца и блока двух стальных колец от запрессовки матрицы и ее полного нагружения осевым усилием получим в виде:

$$P_{c1} = P_{c1}' + \sigma_{r_{c1}}.$$

Откуда контактное давление  $P_{c1}'$  от запрессовки матрицы в блок стальных колец и нагружения ее осевым усилием равно:

$$P_{c1}' = P_{c1} - \sigma_{r_{c1}} = 644,3 - |-357,1| = 287,2 \text{ МПа.}$$

Используя выражение (2), получим величину радиального натяга  $\frac{\delta_1}{2}$  при запрессовке внутреннего кольца:

$$\frac{\delta_1}{2} = P_{c1}' \cdot \frac{r_{c1}}{E} \left[ \frac{1+k_1^2}{1-k_1^2} + \frac{1+k_2^2}{1-k_2^2} \right],$$

где  $k_1^2 = \frac{r_1^2}{r_{c1}^2} = \frac{20^2}{31,07^2} = 0,414$ ;  $k_2^2 = \frac{r_{c1}^2}{r_{c2}^2} = \frac{31,07^2}{48,27^2} = 0,414$ .

Тогда  $\frac{\delta_1}{2} = 287,2 \cdot \frac{31,07}{2,1 \cdot 10^5} \left[ \frac{1+0,414}{1-0,414} + \frac{1+0,414}{1-0,414} \right] = 0,21 \text{ мм.}$

Осевой натяг внутреннего кольца в блок стальных колец составит:

$$h_1 = \frac{\delta_1}{2} = \frac{0,21}{\text{tg}\alpha} = \frac{0,21}{0,0262} = 8,02 \text{ мм.}$$

При синтезе порошков алмазов или кубического нитрида бора усилие прессы в среднем составляет 4500 кН и действует в направлении оси матрицы. Это усилие полностью направлено ко всей поверхности матрицы, поэтому осевое напряжение  $\sigma_z$  после нагружения будет равно [3]:

$$\sigma_z = \frac{P_z}{\pi r_1^2} = -\frac{4500 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 20^2} = -3582,8 \text{ МПа.}$$

После запрессовки матрицы в блок стальных колец и ее полного нагружения, контактное давление на ее боковую поверхность должно составлять значение  $P_1 = 966,4$  МПа. Очевидно, что после осевого нагружения матрицы, она будет уменьшать свою высоту и увеличиваться в диаметре. Так как матрица не имеет осевого отверстия, то радиальные напряжения будут равны окружным ( $\sigma_r = \sigma_t$ ) и должны быть равны величине  $P_1$ .

Используя закон Гука, для объемного напряженного состояния можно записать равенство [2]:

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \mu(\sigma_r + \sigma_z)].$$

Рассматривая совместно последнее выражение для  $\varepsilon_t$  и уравнение (3.2), получим значение перемещения внутренних слоев внутреннего кольца за счет осевого нагружения матрицы. Данное перемещение будет соответствовать радиальному натягу  $\frac{\delta}{2}$  от нагружения матрицы осевым усилием:

$$u = \frac{\delta}{2} = \frac{r_1}{E} [\sigma_t - \mu(\sigma_t + \sigma_z)] = \frac{20}{2,1 \cdot 10^5} [-966,41 - 0,22(-966,41 - 3582,8)] = 0,00328 \text{ мм.}$$

Определим контактное давление на внутреннюю поверхность внутреннего кольца от деформации матрицы в радиальном направлении, используя соотношение вида:

$$P_c'' = \frac{\frac{\delta}{2}}{\frac{r_1}{E_1} \left[ \frac{1+k_1^2}{1-k_1^2} - \mu_1 \right] + \frac{r_1}{E_2} \left[ \frac{1+k_2^2}{1-k_2^2} + \mu_2 \right]},$$

где  $E_1$  – модуль продольной упругости твердого сплава ВК-6;

$E_2$  – модуль продольной упругости стали 35ХГСА;

$\mu_1$  и  $\mu_2$  – коэффициенты Пуассона твердого сплава и стали, соответственно.

Так как матрица не имеет осевого отверстия, то величина  $k_1^2 = 0$ , при этом

$$k_2^2 = \frac{r_1^2}{r_2^2} = \frac{20^2}{75^2} = 0,071.$$

$$\text{Тогда } P_c'' = \frac{0,00328}{\frac{20}{6,8 \cdot 10^5} [1 - 0,18] + \frac{20}{2,1 \cdot 10^5} \left[ \frac{1+0,071}{1-0,071} + 0,22 \right]} = 21,2 \text{ МПа.}$$

Полное контактное давление будет состоять из контактного давления боковой поверхности матрицы при ее осевом напряжении  $P_c''$  и контактного давления от ее запрессовки в блок колец  $P_c'$ :

$$P_c = P_c' + P_c''.$$

Вычислим величину контактного давления от запрессовки матрицы в блок стальных колец:

$$P_c' = P_c - P_c'' = 966,4 - 21,2 = 945,2 \text{ МПа.}$$

В этом случае радиальный натяг от запрессовки матрицы в блок стальных колец будет равен:

$$\begin{aligned} \left( \frac{\delta}{2} \right)' &= P_c' \cdot \left[ \frac{r_1}{E_1} \left( \frac{1+k_1^2}{1-k_1^2} - \mu_1 \right) + \frac{r_1}{E_2} \left( \frac{1+k_2^2}{1-k_2^2} + \mu_2 \right) \right] = \\ &= 945,2 \cdot \left[ \frac{20}{6,8 \cdot 10^5} (1 - 0,18) + \frac{20}{2,1 \cdot 10^5} \left( \frac{1+0,071}{1-0,071} + 0,22 \right) \right] = 0,146 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Тогда осевой натяг матрицы в блок стальных колец составляет:

$$h' = \frac{\left( \frac{\delta}{2} \right)'}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{0,146}{0,0262} = 5,59 \text{ мм.}$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Писаренко Г.С. *Сопротивление материалов: учеб. для вузов* / Г.С. Писаренко [и др.]; под общ. ред. Г.С. Писаренко. – 4-е изд., перераб и доп. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1979. – С. 443-460.
2. Феодосьев, В.И. *Сопротивление материалов: учеб. для вузов* / В.И. Феодосьев. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – С. 389-393.
3. Дудяк, А.И. *Оптимизация радиусов контактов составных толстостенных цилиндров в блок-матрицах аппаратов высокого давления* / А.И. Дудяк, В.М. Хвасько // *Теоретическая и прикладная механика : международный научно-технический сборник* / пред. редкол. А.В. Чигарев. - Вып. 33. – 2018. – С. 81-85.
4. Подскребко, М.Д. *Сопротивление материалов: учеб.* / М.Д. Подскребко. – Минск: Высшая школа, 2007. – С. 653-670.