

## Предельное состояние камер высокого давления

С. В. Мирошниченко<sup>а</sup>, В. Г. Сынков<sup>а</sup>, А. А. Лебедев<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Донецкий физико-технический институт НАН Украины, Донецк, Украина

<sup>б</sup> Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*Приведена методика оценки предельного состояния многослойных камер высокого давления, внутренний слой которых выполнен из материалов с разной степенью пластичности. Задача решена в постановке Ламе–Гадолина–Беляева с помощью критерия прочности Писаренко–Лебедева. Установлено, что предельному состоянию по началу пластического течения соответствует давление, которое может в три и более раз превышать предел текучести материала внутреннего слоя при растяжении. Показано существенное преимущество использования во внутреннем слое сталей по сравнению с твердыми сплавами.*

**Ключевые слова:** предельное состояние, пластичность, предел текучести, камера высокого давления.

Для упрочнения камер высокого давления (КВД) и снижения их материалоемкости используют конструктивные и технологические приемы, которые позволяют уменьшить градиенты напряжений в стенках камеры при рабочей нагрузке или создать оптимальную комбинацию упругих и прочностных характеристик элементов конструкции. Среди конструктивных приемов следует выделить сборку слоев с натягом, обмотку лентой, сегментирование, оптимальную комбинацию физико-механических характеристик материалов; среди технологических – автоскрепление, переменную поддержку, термоградиент [1–6].

Неоднократно предпринимались попытки использовать преимущества разных способов упрочнения в одной камере. Например, предлагалось внутренний слой изготавливать из материала, хорошо сопротивляющегося сжатию (коэффициент пластичности  $\chi = \sigma_t / \sigma_c < 0,6$ , где  $\sigma_t, \sigma_c$  – механические характеристики материала при растяжении и сжатии соответственно), а наружные слои предварительно нагружать за предел упругости (автоскрепить) или обматывать высокопрочной лентой, либо использовать эти варианты в сочетании с сегментированием [2–4, 6]. Однако ввиду низкой пластичности материала внутреннего слоя предъявляются жесткие требования к допуску на нелинейность процесса деформирования слоев поддержки (многослойного бандажа), что сильно затрудняет реализацию указанных схем [7, 8]. Положительного результата удалось достичь только при использовании оригинального способа сборки камер с хрупким внутренним слоем и специальной технологии стабилизации остаточных напряжений в автоскрепленном бандаже [9, 10].

Предельное состояние многослойной КВД в этом случае лучше всего определять по внутреннему давлению  $P_1$ , которое соответствует началу перехода в пластическое состояние материала внутреннего слоя, имеющего толстостенность  $m_1 = d_2 / d_1$  ( $d_2, d_1$  – наружный и внутренний диаметр внутреннего слоя камеры соответственно) и нагруженного по наружной

поверхности давлением  $P_2$ . Причем выбирается меньшее из значений, полученных при решении двух уравнений, первое из которых соответствует предельному давлению  $P_1'$  в  $n$ -слойной камере толстостенностью  $m = d_n/d_1$  ( $d_n$  – наружный диаметр КВД) при оптимальном распределении толстостенности слоев (задача Гадолина–Дроздова), а второе – предельному давлению  $P_1''$ , полученному из условия создания во внутреннем слое предельного состояния при его сборке с наружными втулками (задача Беляева). В обоих случаях предельное состояние КВД по условию текучести внутреннего волокна определяется по обобщенному критерию Писаренко–Лебедева [11]:

$$\chi\sigma_i + (1-\chi)\sigma_1 \leq \sigma_{s1}, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $\sigma_1$  – наибольшее главное напряжение;  $\sigma_{s1}$  – предел текучести материала внутреннего слоя при растяжении.

Для упрощения решения неравенства (1) примем допущения [12] о несжимаемости материала (коэффициент Пуассона  $\mu = 0,5$ ) и отсутствии осевой деформации ( $\varepsilon_z = 0$ ). В этом случае

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2}(\sigma_\tau - \sigma_r), \quad (2)$$

где  $\sigma_\tau, \sigma_r$  – окружные и радиальные напряжения соответственно, вычисляемые по формулам Ламе [1] для внутреннего волокна КВД:

$$\sigma_\tau = P_1 \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} - P_2 \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1}; \quad \sigma_r = -P_1. \quad (3)$$

Осевое напряжение  $\sigma_z$  с учетом тех же допущений [12]:

$$\sigma_z = \mu(\sigma_\tau + \sigma_r) = \frac{2\mu(P_1 - P_2 m_1^2)}{m_1^2 - 1}. \quad (4)$$

Подставив значения компонент напряжений из (3) в (2), получим

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{3}m_1^2(P_1 - P_2)}{m_1^2 - 1}. \quad (5)$$

Необходимо заметить, что корректность использования соотношения (2) при расчете КВД различной геометрической конфигурации соблюдается при условии  $\sigma_\tau > \sigma_z$ . Известно [1], что в зависимости от величины соотношения  $H/d_n$  ( $H$  – длина внутренней полости) различают длинные КВД (трубы),  $H/d_n > 0,5$  и короткие (диски),  $H/d_n < 0,5$ . Главные напряжения в наиболее опасном месте (на поверхности рабочего канала КВД) зависят в соответствии с (3) и (4) от двух параметров:  $m_1$  и  $K = P_2/P_1$ . Из определе-

ния элемента КВД как толстостенной трубы следует  $[d_2/(d_2 - d_1)] \leq 10$ , откуда  $m_1 \geq 1,11$ . С другой стороны, нецелесообразно увеличивать толстостенность элемента КВД, если при фиксированной толстостенности он обеспечивает внутреннее давление, составляющее 90% величины давления в бесконечно толстой трубе, т.е.  $[(m_1^2 - 1)/m_1^2] \leq 0,9$ , откуда  $m_1 \leq 3,16$ .

Сравнение напряжений  $\sigma_\tau$  и  $\sigma_z$  в камерах, имеющих различную конфигурацию, с учетом установленного диапазона  $m_1$  показывает, что окружное напряжение невелико, если параметр  $K$  не превышает некоторую критическую величину  $K_c$ , которую можно вычислить из соотношений:

$$K_c \leq 0,286(2,497 + 1/m_1^2) \quad (\text{в длинных камерах});$$

$$K_c \leq 0,5(1 + 1/m_1^2) \quad (\text{в дисках}).$$

В области реально используемых толстостенностей внутреннего слоя ( $m_1 = 1,5 \dots 2,5$ ) при коэффициенте пластичности материала  $\chi \leq 0,6$  условие  $K < K_c$  соблюдается для камер обеих конфигураций.

Подставив в (1) значение  $\sigma_i$  из (5), а  $\sigma_1 = \sigma_\tau$  из (3) и решив неравенство относительно  $P_1$ , получим

$$P_1^* \leq \sigma_{s1} \frac{m_1^2 - 1}{m_1^2(\sqrt{3}\chi + 1 - \chi) + 1 - \chi} + P_2 \frac{m_1^2(\sqrt{3}\chi + 2 - 2\chi)}{m_1^2(\sqrt{3}\chi + 1 - \chi) + 1 - \chi}. \quad (6)$$

Кроме параметров, определяющих механические и геометрические характеристики внутреннего слоя КВД, в неравенство (6) входит давление поддержки  $P_2$ , способ реализации которого зависит от габаритов КВД. Давление поддержки включает два слагаемых:

$$P_2 = P_{2as} + P_{2r}^{P_1}, \quad (7)$$

где  $P_{2as}$  – сборочное давление, создаваемое запрессовкой внутреннего слоя в многослойный бандаж,  $P_{2r}^{P_1}$  – давление догрузки бандажа рабочим давлением  $P_1$ , вычисляемое согласно [1],

$$P_{2r}^{P_1} = P_1 \frac{2(m^2 - m_1^2)}{m_1^2 C}; \quad (8)$$

$C$  – коэффициент, учитывающий влияние различия между упругими характеристиками используемых материалов,

$$C = \left\{ \frac{E_1}{E_2} (m_1^2 - 1) [(1 - \mu_2)m_1^2 + (1 + \mu_2)m^2] + \right.$$

$$+(m^2 - m_1^2)[(1 - \mu_1)m_1^2 + (1 + \mu_1)] \left\} \frac{1}{m_1^2}; \quad (9)$$

$E_1, E_2$  и  $\mu_1, \mu_2$  – модули упругости и коэффициенты Пуассона материала внутреннего слоя и бандажа соответственно. Если  $E_1 = E_2$ , а  $\mu_1 = \mu_2$ , то  $C = 2(m^2 - 1)$ .

В случае фиксированной для промышленных КВД толстостенности ( $m < 10$ ) при определении давления  $P_2$  учитывается не только прочность бандажной системы, но и условие отсутствия пластичности во внутреннем слое при его запрессовке в бандаж. В предельном случае окружное напряжение на внутреннем волокне КВД при сборке не должно превышать величину  $\sigma_{sl}/\chi$ . В связи с этим соотношение для определения окружного напряжения на внутреннем волокне КВД при ее нагружении можно записать в виде [13]

$$\sigma_r = P_1 \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} - P_{2r} \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1} - \frac{\sigma_{sl}}{\chi}. \quad (10)$$

Подставив (10) в (2) и (1) с учетом (8) и (9), получим выражение для определения внутреннего давления:

$$P_1'' \leq \sigma_{sl} \frac{(2 + \sqrt{3}\chi)(m_1^2 - 1)C}{2\chi\{C[m_1^2(\chi\sqrt{3} + 1 - \chi) + 1 - \chi] - 2(m^2 - m_1^2)(\chi\sqrt{3} + 2 - 2\chi)\}}. \quad (11)$$

Предельное давление в камере найдем из уравнения

$$P_1 = \max(P_1', P_1''), \quad (12)$$

где  $P_1', P_1''$  – величины, определяемые по соотношениям (6) и (11).

Разделив (6) и (11) на  $\sigma_{sl}$ , получим

$$\begin{cases} \bar{P}_1' \leq \frac{m_1^2 - 1}{m_1^2(\chi\sqrt{3} + 1 - \chi) + 1 - \chi} + \bar{P}_2 \frac{m_1^2(\chi\sqrt{3} + 2 - 2\chi)}{m_1^2(\chi\sqrt{3} + 1 - \chi) + 1 - \chi}; \\ \bar{P}_1'' \leq \frac{(2 + \chi\sqrt{3})(m_1^2 - 1)C}{2\chi\{C[m_1^2(\chi\sqrt{3} + 1 - \chi) + 1 - \chi] - 2(m^2 - m_1^2)(\chi\sqrt{3} + 2 - 2\chi)\}}. \end{cases} \quad (13)$$

При  $\chi = 1$  имеем

$$\bar{P}_1' \leq \frac{m_1^2 - 1}{\sqrt{3}m_1^2} + \bar{P}_2; \quad \bar{P}_1'' \leq \frac{(2 + \sqrt{3})(m_1^2 - 1)}{2\sqrt{3}\left[m_1^2 - \frac{2}{C}(m^2 - m_1^2)\right]} \leq 1,08. \quad (14)$$

Таким образом, при любых значениях  $m$  в КВД из пластичных материалов предельное внутреннее давление по началу пластичности соизмеримо с пределом текучести материала 1-го слоя, что соответствует [2]. Достаточно применить двухслойный бандаж, чтобы уже при  $m = 4$  достичь более 90% предельно возможного давления.

При  $\chi \rightarrow 0$  выражения (13) принимают вид

$$\bar{P}'_1 \leq \frac{m_1^2 - 1}{m_1^2 + 1} + \bar{P}_2 \frac{2m_1^2}{m_1^2 + 1}; \quad \bar{P}''_1 \rightarrow \infty. \quad (15)$$

В случае если бандажная система выполнена из пластичных материалов и  $\sigma_2 = \sigma_3 = \dots = \sigma_n$ , то в соответствии с (14) получаем  $\bar{P}_2 \approx 1$ , поэтому при  $m \rightarrow \infty$   $\bar{P}'_1 \leq 3$ . Если прочность слоев бандажа превышает прочность материала 1-го слоя ( $\sigma_{s2}/\sigma_{s1} = S > 1$ ), то имеем соотношение

$$\bar{P}'_1 \leq \frac{(2S + 1)m_1^2 - 1}{m_1^2 + 1},$$

которое при  $m \rightarrow \infty$  стремится к  $\bar{P}'_1 \leq 2S + 1$ .

Для используемых в КВД материалов (твердые сплавы, инструментальные легированные стали, мартенситностареющие стали)  $S = 0,6 \dots 5,0$ . Таким образом, если в КВД 1-й слой выполнен из материала с  $\chi < 0,6$ , то предельное давление может существенно превышать давление в камерах с пластичным внутренним слоем. Уровни рабочих давлений, соответствующих началу текучести при выполнении слоев в КВД из некоторых характерных представителей твердых сплавов и инструментальных сталей, приведены в таблице. В паре с внутренними слоями из различных материалов использовался автоскрепленный до сборки наружный слой из одного и того же материала (сталь ДИ32), пластическое деформирование которого после сборки и последующего нагружения камеры давлением исключалось [10]. Это позволило в несколько раз снизить трудоемкость и материалоемкость бандажа [17], для которого в случае отсутствия автоскрепления необходима трехслойная схема с толстостенностью элемента  $m_b \approx 5$  при общей толстостенности КВД  $m > 10$  [13]. При использовании КВД с автоскрепленным бандажом уже при толстостенности  $m = 6$  достигается 90%-ный уровень прочности камеры с бесконечно толстой стенкой.

Обращает на себя внимание существенное преимущество использования во внутреннем слое КВД твердых сплавов и инструментальных сталей, имеющих относительно низкие значения предела текучести при растяжении и сжатии по сравнению с соответствующими пределами прочности. Вопрос о величине допуска на остаточную деформацию рабочего канала КВД, контактирующего со сжатой жидкостью, до настоящего времени является предметом дискуссии. С одной стороны, Верещагин [18] и Бриджмен [19] указывают на возможность за счет разнокомпонентного сжатия повышения прочности сплавов типа ВК6 до 25 ГПа. С другой стороны, поскольку структурная неоднородность увеличивает чувствительность таких матери-

Значение предельных по началу текучести давлений в КВД

Материал внутреннего слоя	$\sigma_{st}$ , ГПа	$\sigma_{sc}$ , ГПа	$\chi$	$E$ , ГПа	$\mu$	Литера- турный источник	Давление КВД ( $P_1$ , ГПа) при толстостенности $t$					
							3	4	5	6	7	8
ВК6	0,49	1,96	0,25	620	0,22	[14, 16]	1,36	1,59	1,73	1,81	1,86	1,90
ВК13	0,61	1,27	0,48	585	0,24	[14, 16]	1,02	1,15	1,21	1,25	1,27	1,28
Р9К10	1,88	4,18	0,45	220	0,26	[15]	2,06	2,54	2,79	2,95	3,06	3,15
5ХВ2С	1,90	3,65	0,52	206	0,26	[15]	2,04	2,49	2,72	2,87	2,97	3,06

алов к масштабному фактору и градиенту напряжений [20], то даже в КВД для синтеза сверхтвердых материалов инструментальные стали часто используют как альтернативу твердым сплавам [21].

## Резюме

Наведено методику оцінки граничного стану багат шарових камер високого тиску. Внутрішній шар камер виконано з матеріалів із різним ступенем крихкості. Задача розв'язана у постановці Ламе–Гадоліна–Беляєва за допомогою критерію міцності Писаренко–Лебедева. Установлено, що граничному стану по початку пластичної течії відповідає тиск, який може в три і навіть більше разів перевищувати границю текучості матеріалу внутрішнього шару при розтязі. Показано, що сталі порівняно з твердими сплавами мають суттєву перевагу при використанні їх у внутрішньому шарі.

1. Беляев Н. М. Труды по теории упругости и пластичности. – М.: Гос. изд-во инж.-техн. лит., 1957. – 632 с.
2. Циклис Д. С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях. – М.: Химия, 1965. – 432 с.
3. Пономарев С. Д., Федосеев В. И., Малинин Н. Н. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. – М.: Машгиз, 1958. – Т. 2. – 628 с.
4. Сынков В. Г., Лебедев А. А., Черный Ю. Ф., Глауберман О. Е. К расчету автоскрепленных контейнеров высокого давления // Пробл. прочности. – 1976. – № 11. – С. 87 – 92.
5. Ильюшин А. А., Огибалов П. М. Упруго-пластические деформации полых цилиндров. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1960. – 272 с.
6. Бриджмен П. В. Физика высоких давлений. – М.; Л.: ОНТИ, 1935. – 404 с.
7. Гурьева Л. И., Максимов Л. Ю. Упругие характеристики многослойной обмотки // Технология и оборудование для изготовления сосудов на повышенные давления. – М.: НИИИИформтяжмаш, 1972. – С. 23 – 27.
8. Дэвидсон Т. Э., Кендалл Д. П. Механические свойства материалов под высоким давлением. – М.: Мир, 1973. – Вып. 1. – 296 с.
9. А. с. 503701 СССР, М. Кл<sup>2</sup>. Контейнер высокого давления / В. Г. Сынков, В. А. Конозенко, Е. И. Осыка. – Опубл. 25.02.76. Бюл. № 7.

10. Сынков В. Г., Лебедев А. А., Черный Ю. Ф. Исследование приспособляемости деталей контейнеров высокого давления конусным методом // Исследования в области пластического формоизменения металлов. – Ростов н/Д: Рост. ин-т с.-х. машиностроения, 1975. – С. 137 – 144.
11. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1969. – 416 с.
12. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.
13. Гажа Г. П. Расчет сосудов сверхвысокого давления / АН УССР. Институт металлофизики. – Препр. – Киев, 1971. – 112 с.
14. Литошенко Н. В. Оценка условного предела упругости твердого сплава WC-Co при растяжении // Пробл. прочности. – 1999. – № 6. – С. 116 – 122.
15. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1975. – 584 с.
16. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. – Киев: Наук. думка, 1984. – 328 с.
17. Мирошниченко С. В., Сынков В. Г. Эффективность бандажных систем КВД // Физика и техника высоких давлений. – 2001. – № 1. – С. 68 – 72.
18. Верещагин Л. Ф. Синтетические алмазы и гидроэкструзия. Сборник статей. – М.: Наука, 1982. – 328 с.
19. Бриджмен П. В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. – М.: Изд-во иностр. лит., 1955. – 444 с.
20. Новиков Н. В., Лошак М. Г., Шестаков С. И. Применение критерия Писаренко–Лебедева в расчетах прочности аппаратов высокого давления для синтеза сверхтвердых материалов // Пробл. прочности. – 2000. – № 5. – С. 61 – 72.
21. Боримский А. И. Создание высокоэффективных аппаратов высокого давления с матрицами из инструментальных сталей для синтеза СТМ: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1990. – 18 с.

Поступила 06. 06. 2001