

УДК 621.777.4.073.001.8

Мирошниченко С. В.
Сынков В. Г.**ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ШТАМПОВ ДЛЯ РЕВЕРСИВНОЙ ЗАКРЫТОЙ ПРОШИВКИ**

Известно [1], что при закрытой прошивке (рис. 1) напряженно-деформированное состояние (НДС) штампа, базирующееся на модели плоской деформации полых цилиндров сильно отличается от результатов, полученных тензометрией или численным методом [2].

Целью работы является создание методики расчета предельного состояния многослойного штампа для последующего построения программы проектирования инструмента осесимметричного нагружения.

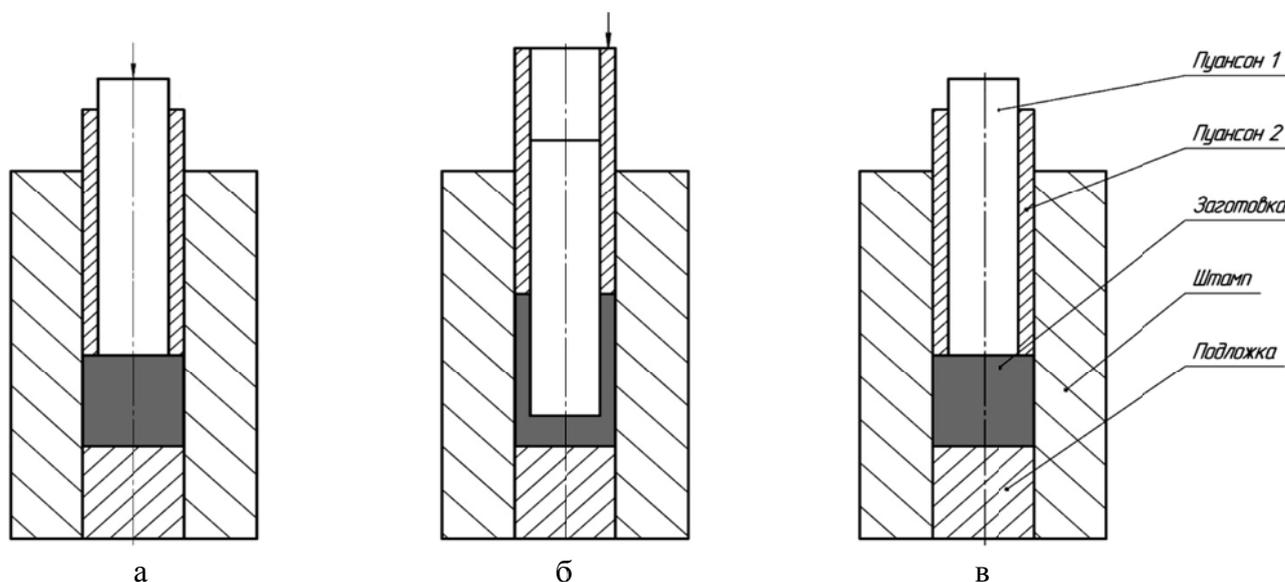


Рис. 1. Схема обработки заготовки реверсивной закрытой прошивкой: а – начало цикла закрытой прошивки; б – конец цикла закрытой прошивки; в – конец цикла реверсирования – восстановления начальной формы

Предельное давление по началу пластической деформации внутренней поверхности штампа определится из соотношения [3]:

$$\chi\sigma_i + (1 - \chi)\sigma_{\tau 1} \leq \sigma_{S1}, \quad (1)$$

где χ – коэффициент хрупкости материала внутреннего слоя; σ_i – интенсивность напряжения; $\sigma_{\tau 1}$ – окружное напряжение.

С помощью введения поправочных коэффициентов в соотношение Малинина [4] для плоской задачи учтем трехмерный характер нагружения:

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2}(K\sigma_{\tau 1} - \sigma_{r1}), \quad (2)$$

где $K(K'_{\sigma 1.P_1}, K''_{\sigma 1.P_1}, K'_{\sigma 1.P_2}, K''_{\sigma 1.P_2})$ – поправочные коэффициенты, учитывающие осесимметричность нагружения при размещении нагрузки вблизи торца и на удалении от него соответственно:

$$K'_{\sigma 1.P_1} = \frac{\sigma'_{\tau 1.P_1}}{\sigma_{\tau 1.P_1}}; \quad K''_{\sigma 1.P_1} = \frac{\sigma''_{\tau 1.P_1}}{\sigma_{\tau 1.P_1}}; \quad K'_{\sigma 1.P_2} = \frac{\sigma'_{\tau 1.P_2}}{\sigma_{\tau 1.P_2}}; \quad K''_{\sigma 1.P_2} = \frac{\sigma''_{\tau 1.P_2}}{\sigma_{\tau 1.P_2}}, \quad (3)$$

где $\sigma'_{\tau 1}$, $\sigma''_{\tau 1}$, σ'_{r1} – главные максимальные напряжения на поверхности рабочего канала для осесимметричного нагружения при размещении нагрузки вблизи торца и на удалении от него соответственно;

$\sigma_{\tau 1}$, σ_{r1} – главные максимальные напряжения при плоской постановке задачи.

$$\sigma_{\tau 1} = P_1 \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} - P_2 \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1}; \quad \sigma_{r1} = -P_1, \quad (4)$$

где P_1 , P_2 – давление на внутренней и наружной поверхности внутренней втулки штампа соответственно;

$m_1 = \frac{d_2}{d_1}$ – коэффициент толстостенности внутреннего слоя штампа.

Подставив (2, 3, 4) в (1), получим:

$$\begin{aligned} & \frac{\sqrt{3}}{2} \chi \left(K'_{\sigma 1.P_1} (K''_{\sigma 1.P_1}) \cdot P_1 \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} - P_2 \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1} \cdot K'_{\sigma 1.P_2} (K''_{\sigma 1.P_2}) + P_1 \right) + \\ & + (1 - \chi) \left(P_1 \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} \cdot K'_{\sigma 1.P_1} (K''_{\sigma 1.P_1}) - P_2 \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1} \cdot K'_{\sigma 1.P_2} (K''_{\sigma 1.P_2}) \right) \leq \sigma_{S1}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $K'_{\sigma 1.P_2}$, $K''_{\sigma 1.P_2}$ – поправочные коэффициенты при размещении нагрузки бандажирования вблизи торца и на отдалении от него соответственно.

Для однослойного неупрочненного бандажа предельное давление P'_{2m} равно [5]:

$$P'_{2m} = \frac{\sigma_{S2}}{\sqrt{3}} \frac{m_2^2 - 1}{m_2^2}, \quad (6)$$

где $m_2 = \frac{d_3}{d_2}$ – коэффициент толстостенности бандажа.

Для упрочненного автоскрепленного бандажа [5]:

$$P''_{2m} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{s2} \ln m_2. \quad (7)$$

После подстановки (6) в (5) имеем для неупрочненного бандажа:

$$\begin{aligned} & \frac{\sqrt{3}}{2} \chi \left[P_1 \left(K'_{\sigma 1.P_1} (K''_{\sigma 1.P_1}) \cdot \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} + 1 \right) - \frac{\sigma_{S2}}{\sqrt{3}} \frac{m_2^2 - 1}{m_2^2} \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1} K'_{\sigma 1.P_2} (K''_{\sigma 1.P_2}) \right] + \\ & + (1 - \chi) \left[P_1 \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} \cdot K'_{\sigma 1.P_1} (K''_{\sigma 1.P_1}) - \frac{\sigma_{S2}}{\sqrt{3}} \frac{m_2^2 - 1}{m_2^2} \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1} K'_{\sigma 1.P_2} (K''_{\sigma 1.P_2}) \right] \leq \sigma_{S1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Решив неравенство (8) относительно P_1 , получим:

$$\bar{P}_1' \leq \frac{2S \cdot m_1^2 (m^2 - m_1^2) K'_{\sigma 1.P_2} (K''_{\sigma 1.P_2}) (\chi\sqrt{3} - 2\chi + 2)}{\sqrt{3} m^2 \left[(K'_{\sigma 1.P_1} (K''_{\sigma 1.P_1}) + 1) \chi\sqrt{3} m_1^2 + K'_{\sigma 1.P_1} (K''_{\sigma 1.P_1}) - 1 \right]}, \quad (9)$$

где $\bar{P}_1 = \frac{P_1}{\sigma_{s1}}$; $S = \frac{\sigma_{S2}}{\sigma_{S1}}$.

Для бандажа, упрочненного автоскреплением [5], после подстановки (7) в (5):

$$\begin{aligned} & \frac{\sqrt{3}}{2} \chi \left[P_1 \left(K'_{\sigma 1.P_1} (K''_{\sigma 1.P_1}) \cdot \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} + 1 \right) - \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S2} \ln m_2 \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1} K'_{\sigma 1.P_2} (K''_{\sigma 1.P_2}) \right] + \\ & + (1 - \chi) \left[P_1 \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} \cdot K'_{\sigma 1.P_1} (K''_{\sigma 1.P_1}) - \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S2} \ln m_2 \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1} K'_{\sigma 1.P_2} (K''_{\sigma 1.P_2}) \right] \leq \sigma_{S1}. \end{aligned} \quad (10)$$

Решив неравенство (10) относительно P_1 , получим:

$$\bar{P}_1 \leq \frac{4Sm_1^2 K'_{\sigma 1.P_2} (K''_{\sigma 1.P_2}) \ln m_2 (\chi\sqrt{3} - 2\chi + 2)}{3\chi m_1^2 (K'_{\sigma 1.P_1} (K''_{\sigma 1.P_1}) + 1) + \sqrt{3} (K'_{\sigma 1.P_1} (K''_{\sigma 1.P_1}) - 1)}. \quad (11)$$

Кроме параметров, определяющих механические и геометрические характеристики внутреннего слоя узла, в неравенство (5) входит давление бандажирования P_2 , схема реализации которого зависит от габаритов камеры. Давление P_2 включает два слагаемых:

$$P_2 = P_{2as} + P_{2r}^{P_1}, \quad (12)$$

где P_{2as} – сборочное давление, создаваемое запрессовкой внутреннего слоя в бандаж;

$P_{2r}^{P_1}$ – давление догрузки бандажа рабочим давлением P_1 , вычисляемым согласно [6]:

$$P_{2r}^{P_1} = P_1 K_2' (K_2'') \frac{2(m^2 - m_1^2)}{m_1^2 C}. \quad (13)$$

Здесь C – коэффициент, учитывающий влияние различия между упругими характеристиками материалов слоев узла;

$K_2' (K_2'')$ – поправочные коэффициенты, учитывающие осесимметричность нагружения сборки при размещении нагрузки вблизи торца и на удалении от него соответственно.

$$C = \left\{ \frac{E_1}{E_2} (m_1^2 - 1) \left[(1 - \mu_2) m_1^2 + (1 + \mu_2) m^2 \right] + (m^2 - m_1^2) \left[(1 - \mu_1) m_1^2 + (1 + \mu_1) m^2 \right] \right\} \frac{1}{m_1^2}, \quad (14)$$

где E_1, E_2, μ_1, μ_2 – модули упругости и коэффициент Пуассона материала внутреннего слоя и бандажа соответственно. Если $E_1 = E_2$, а $\mu_1 = \mu_2$, то $C = 2(m^2 - 1)$.

При определении давления P_2 учитывается не только прочность бандажной системы, но и условия отсутствия пластических деформаций во внутреннем слое камеры давления при его запрессовке в бандаж. В предельном случае окружное напряжение на внутреннем волокне запрессовываемого слоя при сборке не должно превышать величину $\frac{\sigma_{S1}}{\chi}$ [7]. В связи с этим, соотношение для определения окружного напряжения на внутреннем волокне узла при нагружении можно записать в виде:

$$\sigma_{\tau 1} = P_1 K_{\sigma 1, P_1} \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} - P_2^{P_1} \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1} - \frac{\sigma_{S1}}{\chi}. \quad (15)$$

Подставив (15) в (1) и (2) с учетом (13) и (14), получим второе условие для определения внутреннего давления:

$$\begin{aligned} & \chi \frac{\sqrt{3}}{2} P_1 \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} K'_{\sigma 1, P_1} (K''_{\sigma 1, P_1}) + \chi \frac{\sqrt{3}}{2} P_1 - \chi \frac{\sqrt{3}}{2} P_2 \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1} K'_{\sigma 1, P_2} (K''_{\sigma 1, P_2}) + \\ & + P_1 \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} K'_{\sigma 1, P_1} (K''_{\sigma 1, P_1}) - P_2 \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1} K'_{\sigma 1, P_2} (K''_{\sigma 1, P_2}) - \chi P_1 \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} K'_{\sigma 1, P_1} (K''_{\sigma 1, P_1}) + \\ & + \chi P_2 \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1} K'_{\sigma 1, P_2} (K''_{\sigma 1, P_2}) \leq \sigma_{S1}. \end{aligned} \quad (16)$$

Отсюда получаем:

$$\bar{P}_2 \leq \frac{\bar{P}_2 \left\{ \chi \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1} K'_{\sigma 1, P_1} (K''_{\sigma 1, P_1}) \left[\frac{\sqrt{3}}{2} - 1 \right] + 1 \right\} + \sigma_{S1}}{\chi \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} K'_{\sigma 1, P_1} (K''_{\sigma 1, P_1}) \left[\frac{\sqrt{3}}{2} - 1 \right] + \frac{\sqrt{3}}{2}}. \quad (17)$$

Предельное давление в штампе найдем из уравнения:

$$\bar{P}_1 = \min(\bar{P}_1', \bar{P}_1''). \quad (18)$$

Для упрочнения камер высокого давления (КВД) и снижения их материалоемкости используют конструктивные и технологические приемы, с помощью которых уменьшают градиенты напряжений в стенках камеры при рабочей нагрузке или создают оптимальную комбинацию упругих и прочностных характеристик элементов конструкции. Среди конструктивных приемов – сборка слоев с натягом, намотка лентой, сегментирование, оптимальная комбинация физико-механических характеристик материалов; среди технологических – автоскрепление, переменная поддержка, термоградиент [5–6].

Значения поправочных коэффициентов можно получить из уравнений линейной множественной регрессии, приведенных в работе [1]:

$$\sigma_{\tau 1}^{P_1} = 1.68 - 0.93h_0 + 2.24h_L - 0.7m + 0.37l;$$

$$\sigma_{\tau 1}^{P_2} = -1.67 + 1.5h_0 - 3.16h_L + 0.7m - 0.66l,$$

где введены нормированные параметры, характеризующие геометрию очага деформации и геометрические параметры штампа:

- коэффициент толстостенности элементов штампа: $m = d_3/d_1$; $m_1 = d_2/d_1$; $m_2 = d_3/d_2$, где d_1, d_2, d_3 – внутренний, промежуточный и наружный диаметры штампа соответственно;
- относительная высота зоны нагрузки: $h_{L,1} = H_{L,1}/L$; $h_{L,2} = H_{L,2}/L$;
- расстояние от торца штампа до начала зоны нагружения: $h_{0,1} = H_{0,1}/L$; $h_{0,2} = H_{0,2}/L$;
- относительная длина штампа: $l = L/D$, где L, D – длина и наружный диаметр штампа соответственно.

ВЫВОДЫ

Получено выражение для предельного давления на стенки штампа при закрытой прошивке, включающее геометрические параметры штампа и очага деформации, размещения его относительно торцов штампа, механические характеристики материалов его слоев.

Предложенный расчет может быть использован для проектирования штампов и прессформ, что повысит несущую способность узла в 1,2–2 раза, а также в 2–3 раза снизит материалоемкость оснастки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирошниченко С. В. Методика проектирования штампов для прессования порошков и холодного выдавливания прутков / С. В. Мирошниченко, В. Г. Сынков // *Обработка металлов давлением* : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 249–252.
2. Мирошниченко С. В. Численно-экспериментальная методика исследования напряженно-деформированного состояния моделей штампа / С. В. Мирошниченко // *Физика и техника высоких давлений*. – 2009. – Т. 19, № 3. – С. 125–130.
3. Писаренко Г. С. Сопротивление материалов деформированию и разрушению / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. – К. : Наукова думка, 1976. – 416 с.
4. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М. : Машиностроение, 1968. – 400 с.
5. Мирошниченко С. В. Эффективность бандажных систем / С. В. Мирошниченко, В. Г. Сынков // *Физика и техника высоких давлений*. – 2001. – Т. 11, № 1. – С. 90–94.
6. Мирошниченко С. В. Предельное состояние камер высокого давления / С. В. Мирошниченко, В. Г. Сынков, А. А. Лебедев // *Проблемы прочности*. – 2002. – № 5. – С. 32–38.
7. Гажа Г. П. Расчет сосудов сверхвысокого давления / Г. П. Гажа. – К. : препринт ИМФ АН УССР 71.6, 1971. – 112 с.

Мирошниченко С. В. – науч. сотрудник ДонФТИ НАН Украины;

Сынков В. Г. – д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник ИФГП НАН Украины.

ДонФТИ – Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины, г. Донецк.

ИФГП – Институт физики горных процессов НАН Украины, г. Донецк.

E-mail: vasyn41@mail.ru; svmiro@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23.01.2012 г.