

УДК 621.777.4.073.001.8

Мирошниченко С. В.
Сынков В. Г.**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШТАМПА ДЛЯ ЗАКРЫТОЙ ПРОШИВКИ
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАГОТОВОК**

Для упрочнения штампов 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.

Ранее было показано [1, 2], что двухслойные камеры с автоскрепленным наружным слоем могут обеспечить конструктивную прочность узла при радиальных нагрузках до 2–2,5 ГПа. По-видимому, значения предельных нагрузок можно увеличить, если использовать благоприятное сочетание конструктивных и технологических факторов.

Целью работы является создание научной базы для методики проектирования двухслойных штампов, нагруженных на части длины рабочего канала. Методика проектирования штампа должна учитывать назначение и конструктивные особенности, а также технологию упрочнения и сборки его элементов. Нужно также учитывать, что при реализации технологических процессов высота зоны нагружения штампа может существенно отличаться от высоты узла. Если к моменту достижения рабочей нагрузки длина участка нагружения составляет менее 60 % высоты штампа, предельное давление в нем необходимо вычислять с учетом поправок, учитывающих длину участка нагружения, его расположение относительно торцов узла, среднюю толстостенность штампа в зоне нагрузки и соотношение габаритных размеров.

Для проектирования гидростатов и штампов с постоянной по длине толщиной стенки работающих в повторно-статическом режиме необходимы следующие параметры: максимальное давление в рабочем канале $\bar{P}_1 = P_1 / \sigma_{1s}$, диаметр рабочей полости d_1 , наружный диаметр d_n , длина узла H .

С помощью предельных соотношений работы [3] и построенной по ним номограмме $\bar{P}_1 = f(\chi_1, S, E, m)$ выбирают коэффициент толстостенности камеры $m = d_n/d_1$, наружный диаметр d_n , конструкционные материалы (σ_1 ; $\chi_1 = \sigma_{s,t}/\sigma_{s,c}$; $S = \sigma_2/\sigma_1$; $E = E_1/E_2$) и технологическую схему упрочнения банджажа камеры. Здесь $\sigma_{s,t}$, $\sigma_{s,c}$ – пределы текучести материалов при растяжении и сжатии соответственно; σ_2 , σ_1 – допускаемые напряжения в слоях камеры; E_1 , E_2 – модули упругости материалов.

Методика проектирования штампа должна учитывать назначение и конструктивные особенности, а также технологию упрочнения и сборки его элементов [1]. Нужно также учитывать, что при реализации технологических процессов высота зоны нагружения штампа может существенно отличаться от высоты узла. Если к моменту достижения рабочей нагрузки длина участка нагружения составляет менее 60 % высоты штампа, предельное давление в нем необходимо вычислять с учетом поправок, учитывающих длину участка нагружения, его расположение относительно торцов узла, среднюю толстостенность штампа в зоне нагрузки и соотношение габаритных размеров [2].

Поправки необходимо вводить в выражение для окружного напряжения в критическом сечении штампа, используя решения [3, 4] для случая плоской деформации полого цилиндра, а величину поправок получать численным методом или тензометрией [5]:

$$\sigma'_{\tau 1} = K'_{\sigma 1.P_1} (K''_{\sigma 1.P_1}) P_1 \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} - K'_{\sigma 1.P_2} (K''_{\sigma 1.P_2}) P_2 \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1}, \quad (1)$$

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

$$K'_{\sigma 1.P_1} = \frac{\sigma'_{\tau 1.P_1}}{\sigma_{\tau 1.P_1}}, K''_{\sigma 1.P_1} = \frac{\sigma''_{\tau 1.P_1}}{\sigma_{\tau 1.P_1}}, K'_{\sigma 1.P_2} = \frac{\sigma'_{\tau 1.P_2}}{\sigma_{\tau 1.P_2}}, K''_{\sigma 1.P_2} = \frac{\sigma''_{\tau 1.P_2}}{\sigma_{\tau 1.P_2}}, \quad (2)$$

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

$\sigma_{\tau 1}$ – главные максимальные напряжения на поверхности рабочего канала при плоской постановке задачи [4]:

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

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

$m_1 = \frac{d_2}{d_1}$ – коэффициент толстостенности внутренне втулки штампа;

d_1, d_2 – диаметр рабочей полости штампа и наружный диаметр внутренней втулки соответственно.

Предельное давление в начале пластической деформации внутренней поверхности штампа определится из соотношения [4]:

$$\chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_{\tau 1} \leq \sigma_{s1}, \quad (4)$$

где χ – коэффициент хрупкости материала внутреннего слоя;

$\sigma_{\tau 1}, \sigma_i$ – окружное напряжение и интенсивность напряжения на внутренней поверхности штампа соответственно:

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_{\tau 1} - \sigma_{r1}). \quad (5)$$

После подстановки (1–3,5) в (4):

$$\begin{aligned} & \frac{\sqrt{3}}{2} \chi \left[P_1 \left(K'_{\sigma 1.P_1}, (K''_{\sigma 1.P_1}) \cdot \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} + 1 \right) - P_2 \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1} K'_{\sigma 1.P_2}, (K''_{\sigma 1.P_2}) \right] + \\ & + (1 - \chi) \left[P_1 \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} \cdot K'_{\sigma 1.P_1}, (K''_{\sigma 1.P_1}) - P_2 \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1} K'_{\sigma 1.P_2}, (K''_{\sigma 1.P_2}) \right] \leq \sigma_{s1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Решив неравенство (6) относительно P_1 , получим:

$$\begin{aligned} \bar{P}'_1 \leq & \frac{m_1^2 - 1}{(m_1^2 + 1) K'_{\sigma 1.P_1}, (K''_{\sigma 1.P_1}) \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \chi + 1 - \chi \right) + \frac{\sqrt{3}}{2} \chi (m_1^2 - 1)} + \\ & + \bar{P}'_2 \frac{m_1^2 K'_{\sigma 1.P_2}, (K''_{\sigma 1.P_2}) (\sqrt{3} \chi + 2 - 2\chi)}{(m_1^2 + 1) K'_{\sigma 1.P_1}, (K''_{\sigma 1.P_1}) \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \chi + 1 - \chi \right) + \frac{\sqrt{3}}{2} \chi (m_1^2 - 1)}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{где } \bar{P}_1 = \frac{P_1}{\sigma_{s1}}, \bar{P}_2 = \frac{P_2}{\sigma_{s1}}.$$

Кроме параметров, определяющих механические и геометрические характеристики внутреннего слоя узла в уравнения (1, 3) входит давление бандажирования P_2 , схема реализации которого зависит от габаритов камеры. Давление P_2 включает два слагаемых:

$$P_2 = P_{2as} + P_{2r}^{P_1}, \quad (8)$$

где P_{2as} – сборочное давление, создаваемое запрессовкой внутренней втулки в бандаж; $P_{2r}^{P_1}$ – давление догрузки бандажа рабочим давлением P_1 , вычисляемым согласно [4]:

$$P_{2r}^{P_1} = P_1 K_2', (K_2'') \frac{2(m^2 - m_1^2)}{m_1^2 C}. \quad (9)$$

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

K_2', K_2'' – поправочные коэффициенты, учитывающие осесимметричность нагрузки сборки при размещении ее вблизи торца или на удалении от него соответственно.

$$C = \left\{ \frac{E_1}{E_2} (m_1^2 - 1) \left[(1 - \mu_2) m_1^2 + (1 + \mu_2) m^2 \right] + (m^2 - m_1^2) \left[(1 - \mu_1) m_1^2 + (1 + \mu_1) m^2 \right] \right\} \frac{1}{m_1^2}, \quad (10)$$

где $E_1, E_2, \mu_1, \mu_2, m$ – модули упругости, коэффициенты Пуассона материала внутреннего слоя и бандажа, коэффициент толстостенности штампа ($m = d_3/d_1$) соответственно;

d_3 – наружный диаметр бандажа. Если $E_1 = E_2$, а $\mu_1 = \mu_2$, то $C = 2(m^2 - 1)$.

Для однослойного не упрочненного бандажа предельное давление P_{2m}' равно [6]:

$$P_{2m}' = \frac{\sigma_{s2}}{\sqrt{3}} \frac{m_2^2 - 1}{m_2^2}, \quad (11)$$

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

Для упрочненного автоскрепленного бандажа [6]:

$$P_{2m}'' = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{s2} \ln m_2. \quad (12)$$

При определении давления P_2 учитывается не только прочность бандажной системы, но и условия отсутствия пластических деформаций во внутреннем слое штампа при его запрессовке в бандаж. В предельном случае окружное напряжение на внутреннем волокне запрессованной втулки не должно превышать величину σ_{s1}/χ [4]. В связи с этим окружное напряжение на внутренней поверхности штампа при рабочей нагрузке P_1 можно записать в виде:

$$\sigma_{\tau 1}' = K_{\sigma 1.P_1}' (K_{\sigma 1.P_1}'') P_1 \frac{m_1^2 + 1}{m_1^2 - 1} - K_{\sigma 1.P_2}' (K_{\sigma 1.P_2}'') P_{2r}^{P_1} \frac{2m_1^2}{m_1^2 - 1} - \frac{\sigma_{s1}}{\chi}. \quad (13)$$

Подставив (13) в (4) с учетом (8–10), получим второе условие для определения максимального внутреннего давления в штампе:

$$\bar{P}_1'' \leq \frac{(\chi\sqrt{3}+2)(m_1^2-1)}{2\chi \left\{ m_1^2 K'_{\sigma 1.P_1}, (K''_{\sigma 1.P_1})(\chi\sqrt{3}+1-\chi)+1-\chi \right\} - \frac{2}{C} K'_2, (K''_2)(m^2-m_1^2)(\chi\sqrt{3}+2-2\chi)}. \quad (14)$$

Предельное давление в штампе найдем из совместного решения уравнений (7) и (14):

$$\bar{P}_1 = \min(\bar{P}_1', \bar{P}_1''). \quad (15)$$

При использовании в слоях штампа пластичных конструкционных сталей и сплавов ($\chi \approx 1$) имеем:

$$\bar{P}_1' \leq \frac{m_1^2-1}{K'_{\sigma 1.P_1}, (K''_{\sigma 1.P_1})(m_1^2+1)\frac{\sqrt{3}}{2}+(m_1^2-1)\frac{\sqrt{3}}{2}} + \bar{P}_2 \frac{K'_{\sigma 1.p2}, (K''_{\sigma 1.p2})m_1^2\sqrt{3}}{K'_{\sigma 1.P_1}, (K''_{\sigma 1.P_1})(m_1^2+1)\frac{\sqrt{3}}{2}+(m_1^2-1)\frac{\sqrt{3}}{2}}; \quad (16)$$

$$\bar{P}_1'' \leq \frac{(\sqrt{3}+2)(m_1^2-1)}{2\sqrt{3} \left[m_1^2 K'_{\sigma 1.P_1}, (K''_{\sigma 1.P_1}) - K'_2, (K''_2) \frac{2}{C} (m^2 - m_1^2) \right]}.$$

Значения поправочных коэффициентов можно получить из уравнений линейной множественной регрессии, приведенных в работе [5]:

$$\sigma_{\tau 1}^{P_1} = 1,68 - 0,93h_0 + 2,24h_L - 0,7m_1 + 0,37l;$$

$$\sigma_{\tau 1}^{P_2} = -1,67 + 1,5h_0 - 3,16h_L + 0,7m_1 - 0,66l,$$

где введены нормированные параметры, характеризующие геометрию очага деформации и геометрические параметры штампа (рис. 1):

- 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.

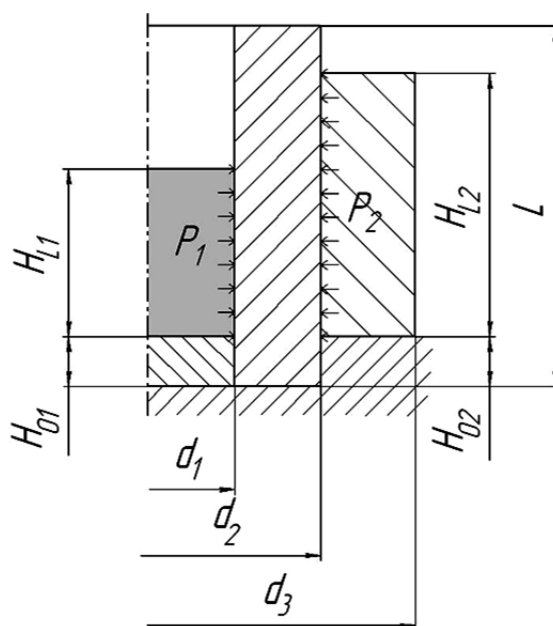


Рис. 1. Расчетная схема двухслойного штампа для закрытой прошивки

Для параметров штампа: $m = 5,76$; $m_1 = 2,4$; $h_{0.1} = h_{0.2} = 0,25$; $h_{L.1} = h_{L.2} = 0,25$; $l = 0,833$; $K_{\sigma 1.P_1} = 0,45$; $K_{\sigma 1.P_2} = 0,38$; $K_2 = 0,82$ получены значения $\bar{P}_1' \leq 0,97$ (не упрочненный бандаж); $\bar{P}_1' \leq 1,63$ (автоскрепленный бандаж); $P_1'' \leq 2,7$. При решении в плоской постановке – $\bar{P}_1' \leq 0,95$, $\bar{P}_1'' \leq 1$.

При использовании в слоях штампа инструментальных сталей и сплавов ($\chi \leq 0,5$) имеем: $\bar{P}_1' \leq 1,4$ (не упрочненный бандаж); $\bar{P}_1' \leq 1,8$ (автоскрепленный бандаж); $\bar{P}_1'' \leq 5$. При решении в плоской постановке: $\bar{P}_1' \leq 1,18$ или $\bar{P}_1'' \leq 2$.

При увеличении участка нагружения до значений $h_{L.1} = h_{L.2} = 0,5$ при тех же параметрах штампа и $\chi = 0,5$ при использовании упрочненного бандажа величина приведенного предельного давления составит $\bar{P}_1' = 1,84$. Значения поправочных коэффициентов в этом случае $K_{\sigma 1.P_1} = 0,71$; $K_{\sigma 1.P_2} = 0,67$; $K_2 = 1,22$.

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 позволит повысить несущую способность узла в 1,2–1,6 раза (до 3–3,5 ГПа), а также в 2–3 раза снизит материалоемкость оснастки.

Реализовать верхний предел несущей способности двухслойного штампа можно при использовании в качестве бандажа, упрочненного до сборки с внутренним слоем, нагружением за предел упругости материала (автоскреплением).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирошниченко С. В. Резервы прочности камер высокого давления / С. В. Мирошниченко, В. Г. Сынков // *Физика и техника высоких давлений*. – 2001. – Т. 11. – № 2. – С. 132–135.
2. Мирошниченко С. В. Предельное состояние штампов для реверсивной закрытой прошивки / С. В. Мирошниченко, В. Г. Сынков // *Обработка металлов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 4 (29). – С. 198–202.*
3. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М. : Машиностроение, 1968. – 400 с.
4. Мирошниченко С. В. Предельное состояние камер высокого давления / С. В. Мирошниченко, В. Г. Сынков, А. А. Лебедев // *Проблемы прочности*. – 2002. – № 4. – С. 32–38.
5. 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. 125–131.
6. Мирошниченко С. В. Эффективность бандажных систем / С. В. Мирошниченко, В. Г. Сынков // *Физика и техника высоких давлений*. – 2001. – Т. 11. – № 1. – С. 90–94.
7. Мирошниченко С. В. Методика проектирования штампов для прессования порошков и холодного выдавливания прутков / С. В. Мирошниченко, В. Г. Сынков // *Обработка металлов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 249–252.*

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

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию 15.02.2012 г.