

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ПЕРФОРАЦИЯ ТРУБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ ЭЛАСТИЧНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

© 2006 В. К. Моисеев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Предложена методика управления последовательностью пробивки отверстий при перфорации трубчатых изделий эластичным инструментом. Приведен пример расчета эластичного пуансона для последовательной перфорации трубчатых фильтров.

Отверстия в стенках трубчатых деталей выполняются различными способами, наиболее распространенными из которых являются сверление, фрезерование, растачивание, пробивка отверстий в штампах. Основные сложности при использовании этих процессов обуславливаются небольшой жесткостью и затрудненным доступом внутрь изделий: смятие и коробление тонкостенных конструкций, поломка инструмента, отклонения от соосности пуансонов и матриц, особенно для длинных изделий небольшого диаметра, неудобство снятия заусенцев на внутренней поверхности труб и т. д. Этих недостатков лишено выполнение разделительных операций штамповкой эластичной средой по жесткой матрице. При такой штамповке изделия не коробятся и одновременно калибруются, а на кромке среза со стороны действия эластомера образуются скругления с радиусом, равным примерно толщине стенки трубы.

Так как разделительные операции осуществляются, в основном, при размещении эластичного инструмента внутри трубы, то снимается исключительно трудоемкая и сложная ручная операция по снятию заусенцев на внутренней поверхности изделия.

На рисунке 1 представлена схема пробивки отверстий с помощью полиуретанового пуансона в универсальном штампе. Этот универсальный штамп предназначен для штамповки из трубчатых заготовок фильтров нескольких близких типоразмеров с большим количеством отверстий и неглубоким рельефом поверхности. Детали изготавливаются из цельнотянутых трубчатых заготовок из нержавеющей стали, толщина стенки трубы 1 мм. Штамп состоит из обоймы 1 со встав-

кой 2, устанавливаемых и закрепляемых на столе пресса 12, разъемной матрицы 3, эластичного пуансона 5, штока 6, прикрепляемого к ползуну пресса, направляющей 7, упора 10 и выталкивателя 11.

Штамп работает следующим образом. В исходном состоянии на столе пресса стоит обойма 1 со вставкой 2, а шток 6 находится на ползуне пресса, выведенном в верхнее положение. Выталкиватель 11 опущен вниз. Внутри вставки 2 устанавливается упор 10, на него надевается трубчатая заготовка 4 с матрицей 3. В заготовку вкладывается полиуретановый пуансон 5, ставится и закрепляется направляющая 7. Шток 6 на холостом ходу пресса опускается и входит в направляющую 7 (рис.1, слева). При создании усилия пресса шток 6 давит на полиуретановый пуансон 5, полиуретан оказывает воздействие на стенку заготовки и деформирует ее вплоть до разделения по острым режущим кромкам матрицы. В результате получается деталь 8, соответствующая профилю и контуру матрицы (рис.1, справа). После снятия нагрузки шток 6 выводится в верхнее положение, открепляется и снимается направляющая 7. С помощью выталкивателя 11 и упора 10 из вставки 2 выводится матрица 3 с деталью 8 и отходом 9 и пуансон 5. Разъемная матрица раскрывается, из нее извлекается готовая деталь. После удаления из отверстий полуматриц отхода 9 цикл изготовления детали начинается снова. Сменными в штоке являются матрица 3, которая заменяется при каждой смене наименования штампуемой детали, а также вставка 2, пуансон 5, шток 6, направляющая 7 и упор 10, которые заменяются в том случае, когда меняется диаметр загото-

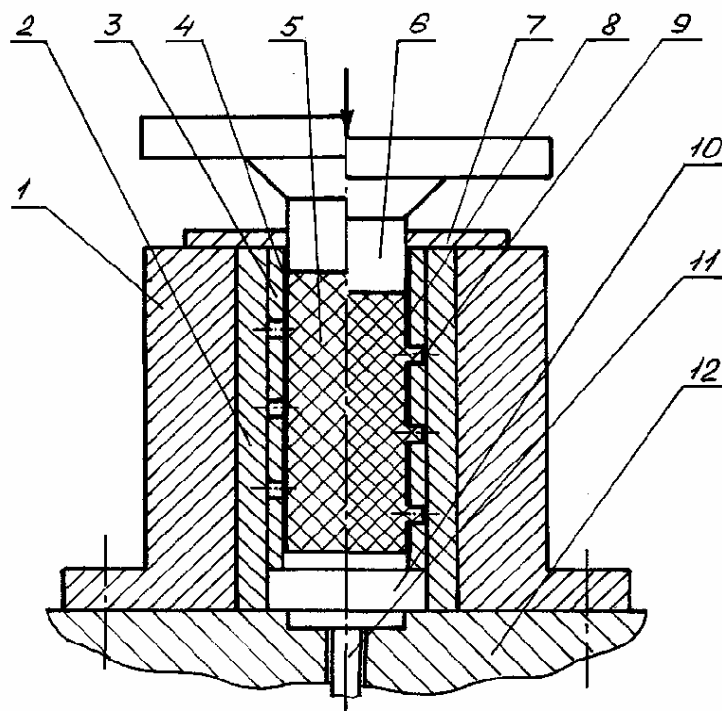


Рис. 1. Схема штампа для пробивки отверстий в трубной заготовке полиуретановым пуансоном по жесткой матрице: 1 – обойма; 2 – вставка; 3 – матрица; 4 – трубная заготовка; 5 – пуансон; 6 – шток; 7 – направляющая; 8 – деталь; 9 – отход; 10 – упор; 11 – выталкиватель; 12 – стол пресса

вок. Конструкция данного и подобных штампов защищена авторскими свидетельствами на изобретения [1, 2].

Эластичный пуансон целесообразно изготавливать составным из шайб, причем диаметры верхних шайб пуансона должны быть меньше диаметров нижележащих шайб с тем, чтобы между заготовкой и эластичным пуансоном в исходном состоянии имелся увеличивающийся кверху зазор. В верхней части пуансона между эластичными шайбами рекомендуется ставить металлические прокладки толщиной 1...2 мм.

Зазор и прокладки позволяют регулировать давление эластичной среды на заготовку так, что давление внизу будет большим, чем давление в верхней части. В этом случае пробивка отверстий на начальной стадии осуществляется в нижней части трубной заготовки с последующим распространением вверх. Такое конструктивное решение эластичного пуансона – переменной жесткости – позволяет управлять давлением эластичной среды [3, 4]. В случае, если пуансон будет выполнен с постоянным диаметром, равным внутреннему диаметру заготовки, пробивка отверстий начнется в верхней части с последую-

щим распространением вниз. При этом эластомер затекает в верхние отверстия матрицы и смещается вниз, заполняя нижний ряд отверстий. Такое перетекание эластичного материала приводит к его разрушению, выкрашиванию и выходу из строя иногда после первого цикла нагружения.

Таким образом, более предпочтительной является технологическая схема перфорации эластичным пуансоном переменной жесткости, т. е. управляемым давлением эластичной среды. Для осуществления схемы перфорации снизу вверх необходимо разработать методику определения размеров верхних шайб пуансона, обеспечивающих указанный выше зазор между пуансоном и заготовкой в начальной стадии процесса. Этот зазор должен сокращаться по мере нарастания усилия штамповки так, чтобы в момент его исчезновения нижняя часть заготовки уже оказалась бы нагруженной некоторым давлением  $Dq$ . Величина  $Dq$  должна обеспечить компенсацию возможной разницы в необходимом давлении пробивки отверстия  $Dq_1$  из-за разнотолщинности стенки  $Ds$  в пределах допуска. Кроме того, это давление должно компенсировать потери на трение  $Dq_2$ , кото-

рое вызывает падение давления по высоте заготовки. Следовательно,

$$Dq = Dq_1 + Dq_2. \quad (1)$$

Для пробивки круглых отверстий диаметром до  $1/3 \dots 1/4$  диаметра заготовки, а именно такие отверстия и имеют упомянутые выше фильтры, необходимое давление составляет [4]

$$q = \frac{4sS_{cp}}{d} = \frac{3sS_B}{d}, \quad (2)$$

где  $s$  – толщина стенки заготовки;  $S_B$  – предел прочности материала трубы;  $d$  – диаметр пробиваемого отверстия.

Таким образом, первая составляющая в формуле (1)

$$Dq_1 = \frac{3DsS_B}{d}. \quad (3)$$

Для определения потерь на трение можно использовать следующую расчетную модель (рис. 2). Эластичный элемент толщиной  $dx$  находится в равновесии под действием давлений  $q$ ,  $q - dq$  и сил трения элемента о заготовку  $F$ . Учитывая, что силы давления и трения распределены по соответствующим площадям, уравнение равновесия элемента в проекции на ось  $x$  будет иметь вид:

$$q \frac{pd^2}{4} - (q - dq) \frac{pd^2}{4} - F = 0, \quad (4)$$

где  $d$  – диаметр элемента (диаметр внутренней поверхности трубной заготовки).

Пренебрегая бесконечно малыми второго порядка, силу трения можно выразить через давление, площадь и коэффициент трения

$$F = fqpddx, \quad (5)$$

где  $f$  – коэффициент трения между эластичной средой и заготовкой.

Коэффициент трения между эластомерами и металлами зависит от многих факторов, главными из которых при холодной квазистатической штамповке являются марки материалов контактирующих пар, твердость эластомера и величина контактного давления. С достаточной для инженерных расчетов точностью коэффициент трения можно определять упрощенно:

$$f = \frac{b}{q+a} + c, \quad (6)$$

где  $q$  – величина давления эластичной среды;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты, учитывающие марки материалов и наличие смазки [4].

С учетом (5) и (6) уравнение равновесия эластичного элемента (4) можно переписать в виде

$$q \frac{pd^2}{4} - (q - dq) \frac{pd^2}{4} - \left( \frac{b}{a+q} + c \right) qpddx = 0. \quad (7)$$

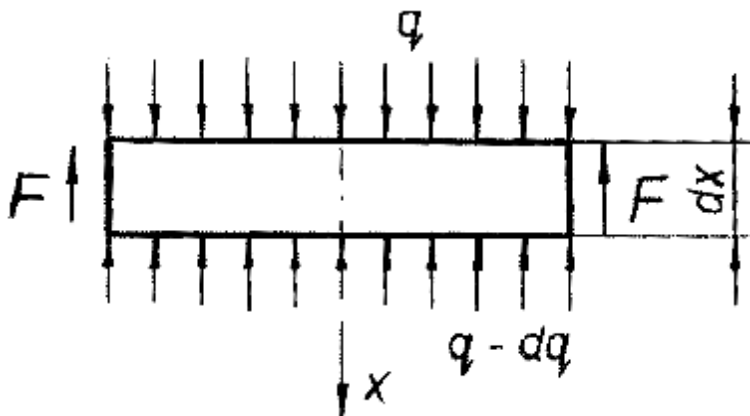


Рис. 2. Элемент эластичного пуансона под нагрузкой

После соответствующих преобразований и интегрирования была получена следующая логарифмическая зависимость:

$$x = \left( \frac{1}{m} - \frac{a}{n} \right) \ln(mq + n) + \frac{a}{n} \ln q + \left( \frac{a}{n} - \frac{1}{2m} \right) \ln m + C, \quad (8)$$

$$\text{где } m = \frac{4c}{d}; \quad n = \frac{4(b+ac)}{d}.$$

Постоянную интегрирования  $C$  можно определить, используя граничные условия:

$$x = 0; \quad q = q_T = \frac{4P}{pd^2}.$$

Это означает, что на верхнем торце эластичного пуансона действует давление  $q_T$ , на которое трение не оказывает влияния.

В окончательном виде связь между давлением эластичной среды и координатой  $x$ , обозначающей расстояние от торца эластичного пуансона, может быть представлена следующей зависимостью:

$$x = \frac{1}{n} \left( \frac{b}{c} \ln \frac{mq + n}{mq_T + n} + a \ln \frac{q}{q_T} \right). \quad (9)$$

Полученная зависимость (9) проиллюстрирована графиками (рис. 3), на которых показано падение давления по высоте трубы

относительно торцевого давления  $q_T$  при различных его значениях (от 10 до 600 МПа). Расстояние от торца представлено в безразмерном виде отношением расстояния  $x$  к внутреннему диаметру трубы  $d$ . Расчет произведен для контактирующих пар: полиуретан СКУ-7Л - нержавеющая сталь 12Х18Н10Т - без смазки.

По этим графикам для конкретного случая несложно определить величину второй составляющей формулы (1)  $Dq_2$  для нижней части штампуемой детали.

Характеристика сжатия эластичной шайбы описывается зависимостью [5]

$$P = \frac{1}{3} E F b \left( \frac{1}{I^2} - 1 \right), \quad (10)$$

где  $I = \frac{h-D}{h}$  - степень сжатия шайбы;  $h$  - начальная высота шайбы;  $D$  - осадка по высоте;  $F$  - начальная площадь торца;  $E$  - модуль упругости;  $b$  - коэффициент ужесточения.

Модуль упругости  $E$  эластомеров зависит от их марки и твердости [4, 5]. Для полиуретана, наиболее часто применяемого в штамповке (СКУ-7, тв. 82...84 ед. по Шору А), он составляет примерно 10 МПа. Коэффициент ужесточения  $b$  учитывает краевой эффект и зависит от отношения диаметра шайбы к ее высоте [5] (рис. 4).

Модуль упругости  $E$  эластомеров зависит от их марки и твердости [4, 5]. Для полиуретана, наиболее часто применяемого в штамповке (СКУ-7, тв. 82...84 ед. по Шору А), он составляет примерно 10 МПа. Коэффициент ужесточения  $b$  учитывает краевой эффект и зависит от отношения диаметра шайбы к ее высоте [5] (рис. 4).

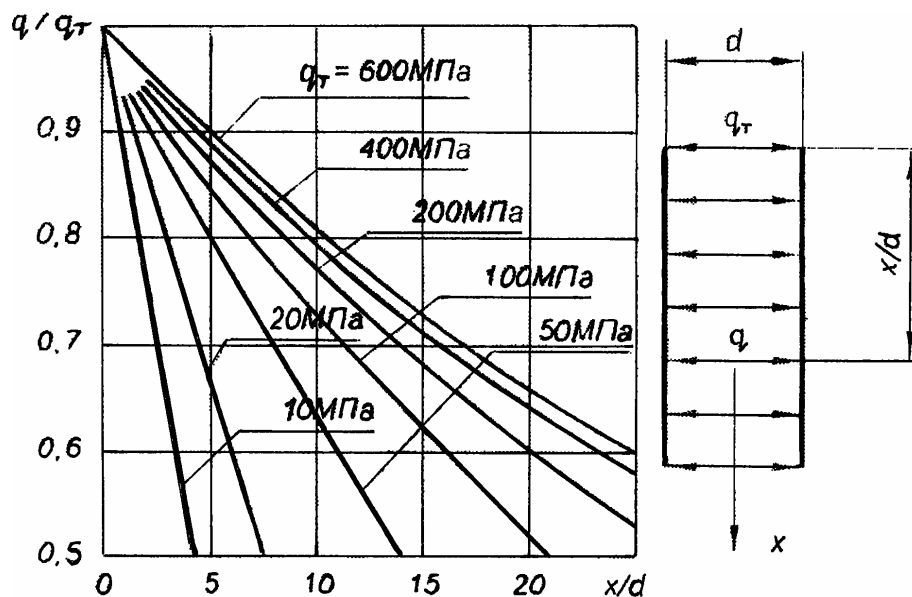


Рис. 3. Распределение давления полиуретана

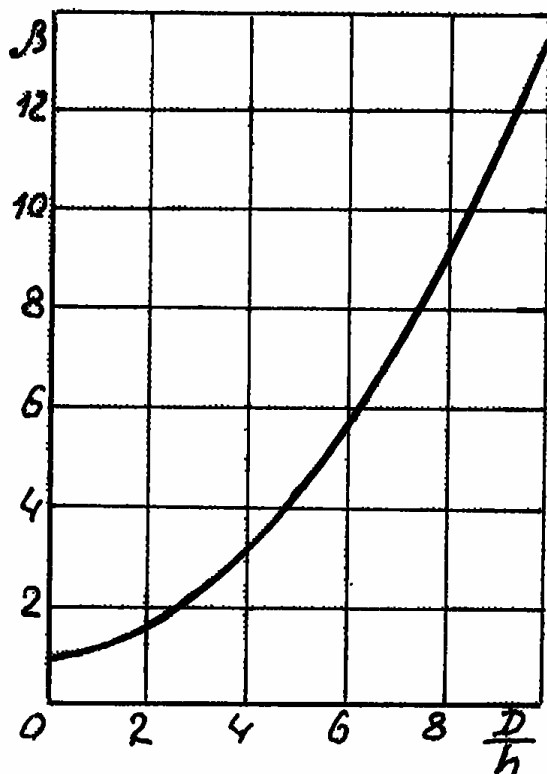


Рис. 4. Зависимость коэффициента ужесточения  $b$  от соотношения диаметра и высоты шайбы

С учетом найденного суммарного значения  $Dq$  формулу (10) можно переписать в виде

$$Dq = \frac{1}{3} Eb \left( \frac{1}{I^2} - 1 \right). \quad (11)$$

Исходя из этой зависимости и равенства объема верхней шайбы составного пуансона до и после сжатия, можно определить исходный диаметр верхней шайбы, т. е. обеспечить переменный зазор между заготовкой и эластичным пуансоном.

Рассмотрим пример расчета пуансона для последовательного перфорирования одного из фильтров в штампе, представленном на рис. 1. Фильтр имеет отверстия диаметром 8 мм, расположенные на длине 200 мм. Внутренний диаметр фильтра составляет 58 мм, толщина стенки  $1^{+0,1}$  мм, материал – нержавеющая сталь 12X18H10T,  $s_B = 660$  МПа.

Давление, необходимое для пробивки отверстий, в соответствии с формулой (2) составит

$$q = \frac{3 \cdot 1 \cdot 660}{8} \approx 250 \text{ МПа.}$$

Согласно графику (рис. 3) при  $\frac{x}{d} = \frac{200}{58} \approx 3,5$

и  $q = 250$  МПа отношение  $\frac{q}{q_T} \approx 0,9$ , т. е. для

компенсации потерь на трение необходимо увеличить давление на торце пуансона на величину  $Dq_2 \approx 25$  МПа.

С учетом возможной разнотолщинности в пределах допуска на толщину  $Ds = 0,1$  мм по формуле (3)

$$Dq_1 = \frac{3 \cdot 0,1 \cdot 660}{8} \approx 25 \text{ МПа,}$$

и суммарное увеличение давления в соответствии с формулой (1)

$$Dq = 25 \text{ МПа} + 25 \text{ МПа} = 50 \text{ МПа.}$$

Таким образом, для обеспечения последовательной пробивки отверстий снизу вверх верхняя шайба пуансона должна иметь диаметр, обеспечивающий такой зазор между пуансоном и заготовкой, который будет сокращаться до нуля при сжатии шайбы давлением на торце величиной 50 МПа.

Пусть исходный диаметр верхней шайбы имеет диаметр  $D$ , а шайбы изготовлены из листа толщиной  $h = 20$  мм, т. е. объем шайбы составляет

$$V = \frac{pD^2 \cdot 20}{4}.$$

После деформирования на величину  $D$  по высоте под воздействием давления  $Dq=50$  МПа объем равен

$$V = \frac{p58^2 \cdot (20 - \Delta)}{4}.$$

Исходя из допущения о несжимаемости, т. е. равенства объемов, можно получить

$$D = \sqrt{3364 - 168D}. \quad (12)$$

Коэффициент ужесточения в формуле (11) можно приближенно определить, пренебрегая величиной зазора в силу его малости по сравнению с диаметром шайбы, т. е. при-

няв  $\frac{D}{h} = \frac{58}{20} = 2,9$ . С учетом этого из графика (рис. 4) следует, что  $b \gg 3,3$ .

Из уравнения (11) с учетом того, что шайба высотой 20 мм сжимается предварительно давлением 50 МПа, т.е.  $Dq = 50$  МПа, можно получить, что  $D = 7,3$  мм, и из уравнения (12)  $D = 46$  мм.

Таким образом, в исходном состоянии в верхней части пуансона необходимо обеспечить зазор между пуансоном и заготовкой 6 мм на сторону и выполнить пуансон в виде усеченного конуса с верхним диаметром 46 мм и нижним диаметром 58 мм.

Пробивка отверстий таким эластичным инструментом будет происходить по благоприятной схеме снизу вверх.

Технологический процесс последовательной перфорации трубчатых изделий эластичным инструментом внедрен в производство при изготовлении топливных фильтров космической техники.

### Список литературы

1. Авт. свид. №624686 МКИ В21d28. Устройство для пробивки отверстий в трубчатых деталях эластичной средой./ А. Д. Комаров, В. К. Моисеев, Т. А. Голиусов и др. (СССР).
2. Авт. свид. №1184586 МКИ В21d28. Устройство для пробивки отверстий в трубчатых заготовках преимущественно эластичной средой./ А. Д. Комаров, В. К. Моисеев, А. В. Домогатский (СССР).
3. Авт. свид. №755378 МКИ В21d28. Способ штамповки./ В. К. Моисеев, В. Д. Щеголевых, А. Д. Комаров и др. (СССР).
4. Барвинок В. А., Кирилин А. Н., Комаров А. Д., Моисеев В. К. и др. Высокоэффективные технологические процессы изготовления элементов трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов. – М.: Наука и технологии, 2002.
5. Пономарев С. Д., Бидерман В. Л., Лихарев И. К. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. Т.2. – М.: Машгиз, 1956.