

УДК 621.77.014

## ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ МНОГОСЛОЙНОЙ ВЫТЯЖКИ ИЗДЕЛИЯ

**Н.И. СТРИКЕЛЬ, Ю.Л. БОБАРИКИН, Д.А. ПАРХОМЕНКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Введение.** Современное машиностроение требует применения прогрессивных конструкционных материалов, к числу которых относятся металлические композиты и, в частности, двух- и многослойные материалы. Их применение позволяет, с одной стороны, придавать изделиям определенное сочетание технологических и потребительских свойств, которое не может быть получено при использовании традиционных конструкционных материалов. С другой стороны, использование слоистых композитов этого класса позволяет сократить расход дорогостоящих и дефицитных металлов и сплавов.

В работе [1] описаны способы получения многослойных полых изделий из листовых заготовок комбинированной вытяжкой при различном расположении мягкого и твердого слоёв. В этой же работе показаны пути снижения неравномерности деформации слоёв из материалов разной твердости при их совместной вытяжке, а также методы и устройства, позволяющие повысить прочность сцепления слоёв. Известен также способ получения двухслойного композиционного изделия путем совместной вытяжки металлической основы и металлопорошкового покрытия [2].

Основным показателем качества многослойных изделий, в большинстве случаев определяющим их функциональную пригодность, является прочность соединения слоёв, наличие требуемых эксплуатационных свойств. В этом отношении способ многослойной вытяжки металлических и металлопорошковых материалов, сочетающий высокую производительность с возможностью получения прочного соединения слоёв, открывает большие возможности.

Новые технологические решения при изготовлении композиционных материалов могут найти широкое применение на практике после соответствующих теоретических и экспериментальных исследований, определяющих основные возможности и особенности изучаемого способа. Целью данной работы является получение аналитических зависимостей для определения основных энергосиловых параметров технологического процесса вытяжки многослойного композиционного изделия и экспериментальная их проверка.

**Энергосиловые параметры.** В качестве наиболее важных силовых параметров выделим следующие:

1. Усилие вытяжки.
2. Работа деформации металлопорошкового слоя.
3. Давление в металлопорошkovом слое, действующее в процессе деформации.
4. Сдвигающее напряжение на границе между порошковым и металлическими слоями.

Первые два параметра необходимы для выбора технологического оборудования; два последних – для прогнозирования требуемых свойств изделий.

На рис. 1 дана схема вытяжки многослойного полого композиционного изделия.

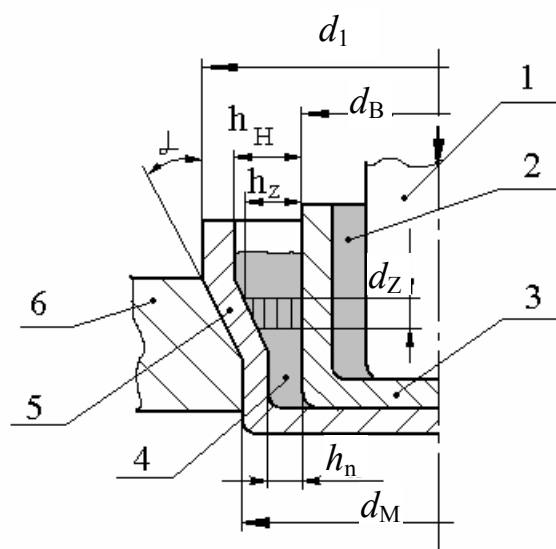


Рис. 1. Схема вытяжки многослойного полого композиционного изделия: 1 – пуансон; 2 – внутренний порошковый слой; 3 – внутренний металлический слой; 4 – промежуточный порошковый слой; 5 – наружный металлический слой; 6 – матрица;  $h_H$  и  $h_n$  – начальная и конечная толщина промежуточного порошкового слоя;  $h_z$  – текущее значение толщины промежуточного слоя в процессе деформации;  $\alpha$  – угол конуса матрицы;  $d_B$  – наружный диаметр промежуточного мягкого металлического слоя;  $d_z$  – высота выделенного элемента

Изготовлению многослойного изделия предшествует получение из плоской листовой заготовки полого металлического стакана, необходимого для изготовления внутреннего металлического слоя. Затем этот стакан размещают в вытяжную матрицу с рабочим отверстием, обеспечивающим при вытяжке получение внутреннего слоя диаметром  $d_0$ .

Между боковыми стенками стакана и пуансоном 1 размещают металлический порошок и производят вытяжку внутренних слоев. После этого в вытяжном штампе меняют матрицу на ту, которая приведена на рис. 1, имеющую рабочее отверстие диаметром  $d_M$ . Между металлическим внутренним слоем и матрицей устанавливают второй металлический стакан наружного диаметра  $d_1$  (см. рис. 1), необходимый для получения наружного металлического слоя. Этот стакан также предварительно получают вытяжкой за один или два перехода из листовой заготовки. Между боковыми стенками второго стакана и внутренним металлическим слоем размещают металлический порошок промежуточного слоя и осуществляют вытяжку многослойного изделия. При вытяжке промежуточный металлопорошковый слой обжимается по толщине с размера  $h_H$  до размера  $h_n$ , а наружный металлический стакан меняет свой диаметр с размера  $d_1$  до размера  $d_M$ .

В работе [3] дан теоретический анализ и приведены результаты исследования процесса совместной вытяжки покрытия и основы. Приведенные в этой же работе [3] зависимости во многом пригодны и для описания процесса деформирования промежуточного слоя при многослойной вытяжке. Отличие состоит в условиях контакта по внутренней по отношению к порошковому слою поверхности и отсутствии при получении промежуточного металлопорошкового слоя отрицательного воздействия пуансона при съеме изделия. В работе [3] не определены аналитические зависимости для расчёта работы деформации, необходимые для определения затрат энергии и мощности на выполнение технологической операции.

Для получения этих зависимостей воспользуемся методом баланса работ. Уравнение равенства работ внешних и внутренних сил можно представить в нашем случае в следующем виде [4]:

$$A_A - A_{TP} = A_M + A_{II}, \quad (1)$$

где  $A_A$  – работа активных внешних сил;  $A_{TP}$  – работа сил контактного трения;  $A_M$  – работа пластической деформации при вытяжке металлической листовой заготовки наружного слоя;  $A_{II}$  – работа пластической деформации промежуточного порошкового слоя.

Каждую из этих работ, за исключением последней, можно найти, используя известные зависимости.

Для определения величины  $A_{II}$  воспользуемся следующей зависимостью [4]:

$$A_{II} = \iiint_V \sigma_i \varepsilon_i dV, \quad (2)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций;  $V$  – деформируемый объём.

Условие пластичности используем в следующем виде [3]:

$$\sigma_i = \sigma_{СП}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{СП}$  – сопротивление деформации порошкового материала, которое в свою очередь определим, используя методику, изложенную в [5] и [3],

$$\sigma_{СП} = \left( \frac{h_n \cdot \theta_n}{h_z} \right)^m \left( \sigma_T + \frac{\theta_n \cdot a_m \cdot (h_H - h_n)^n}{2h_H^n} \right), \quad (4)$$

где  $h_H$ ,  $h_z$ ,  $h_n$  – соответственно, начальная, текущая и конечная толщина порошкового слоя;  $\theta_n$  – конечная относительная плотность порошкового слоя;  $m$  – опытный коэффициент;  $\sigma_T$  – предел текучести металлической составляющей порошкового слоя;  $a_m$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты для определения сопротивления деформации металлической составляющей порошкового слоя в процессе его деформации.

Интенсивность деформации определим используя следующее выражение [4]:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  – главные линейные деформации.

Так как в нашем случае протяженность очага деформации в тангенциальном направлении значительно превышает радиальные и осевые размеры, то можно принять схему плоского деформированного состояния. В этом случае:

$$\varepsilon_i = 1,155 \frac{h_H - h_z}{h_H}. \quad (6)$$

Объём выделяемого в деформируемом слое порошка элемента определим как:

$$dV = \pi(d_B + h_z) \cdot h_z \cdot dz = \pi \cdot \frac{d_B + h_z}{\operatorname{tg} \alpha} \cdot h_z \cdot dh_z, \quad (7)$$

где  $V$  – объём деформируемого порошка;  $d_B$  – наружный диаметр промежуточного мягкого металлического слоя;  $\alpha$  – угол конуса вытяжной матрицы.

Подставив из (3),(4),(6) и (7) в (2) получим после интегрирования:

$$A_{II} = \frac{1,155 \cdot \pi \cdot H \cdot h_n^m \cdot \theta^m}{(h_H - h_n) \cdot h_H} \cdot \left[ \sigma_T + \frac{\theta_n \cdot a_m \cdot (h_H - h_n)^n}{2 \cdot h_H^n} \right] \times \\ \times \left[ d_B \cdot \left( \frac{h_H}{h_n} - 1 \right) + (d_B - h_H) \cdot \ln \left( \frac{h_H}{h_n} \right) + h_H - h_n \right], \quad (8)$$

где  $H$  – высота порошкового слоя в вытянутом изделии.

Уравнение баланса работ (1) преобразуем к следующему виду:

$$A_A = A_{TP} + A_M + A_{II}. \quad (9)$$

Первые два слагаемые определим используя зависимость [4]:

$$A_{TP} + A_M = \pi \cdot \frac{d_H^2}{4} \cdot (k_B^2 - 1) \cdot s_0 \cdot \sigma_s \times \\ \times \left[ \ln k_B - \frac{k_B^2 - 1}{4 \cdot k_B^2} + \frac{\mu \cdot A_{II}}{H \pi \cdot s_0 \cdot d_H \cdot (k_B + 1) \cdot \sigma_s} + \frac{s_0}{2 \cdot r_M + s_0} \right] \cdot (1 + 1,6 \cdot \mu), \quad (10)$$

где  $d_H$  – наружный диаметр изделия;  $k_B = d_1/d_H$  – коэффициент вытяжки;  $s_0$  – толщина металлической заготовки наружного слоя;  $\sigma_s$  – сопротивление деформированию листового металла наружного слоя;  $\mu$  – коэффициент трения между наружным металлическим слоем и матрицей;  $r_M$  – радиус скругления матрицы.

Используя зависимость (10) преобразуем выражение (9) к следующему виду:

$$A_A = A_{II} + \pi \cdot \frac{d_H^2}{4} \cdot (k_B^2 - 1) \cdot s_0 \cdot \sigma_s \times \\ \times \left[ \ln k_B - \frac{k_B^2 - 1}{4 \cdot k_B^2} + \frac{\mu \cdot A_{II}}{H \pi \cdot s \cdot d_H \cdot (k_B + 1) \cdot \sigma_s} + \frac{s_0}{2 \cdot r_M + s_0} \right] \cdot (1 + 1,6 \cdot \mu). \quad (11)$$

Для определения максимального усилия вытяжки воспользуемся зависимостью [6]:

$$A_A = c \cdot P_{\max} \cdot (H + s_0), \quad (12)$$

где  $c$  – опытный коэффициент;  $P_{\max}$  – максимальное усилие, действующее при вытяжке.

Используя (11) и (12), получим расчётную формулу для определения усилия вытяжки:

$$P_{\max} = \frac{1}{c \cdot (H + s_0)} \left\{ A_{II} + \pi \cdot \frac{d_H^2}{4} \cdot (k_B^2 - 1) \cdot s_0 \cdot \sigma_s \times \right. \\ \left. \times \left[ \ln k_B - \frac{k_B^2 - 1}{4 \cdot k_B^2} + \frac{\mu \cdot A_{II}}{H \pi \cdot s \cdot d_H \cdot (k_B + 1) \cdot \sigma_s} + \frac{s_0}{2 \cdot r_M + s_0} \right] \cdot (1 + 1,6 \cdot \mu) \right\}. \quad (13)$$

Величину давления в порошковом слое при вытяжке определим как

$$p = \frac{A_{II}}{\pi \cdot H \cdot (h_H - h_n) \left( d_B + \frac{h_H - h_n}{2} \right)}. \quad (14)$$

Величина сдвигающего напряжения на границе между порошковым и металлическими слоями

$$\tau = \mu \cdot p = \frac{\mu \cdot A_{D_n}}{\pi \cdot H \cdot (h_H - h_n) \cdot \left( d_B + \frac{h_H - h_n}{2} \right)}. \quad (15)$$

Таким образом, определив по расчётной формуле (8) величину работы деформации порошкового слоя, можно, используя зависимость (13), (14) и (15), определить все необходимые энергосиловые параметры вытяжки многослойных полых изделий: работу деформации, усилие вытяжки и величину давления в порошковом слое при вытяжке.

**Методы испытаний.** Для экспериментального исследования совместной вытяжки металлического материала и металлопорошка были использованы набор пуансонов диаметром 19, 21, 23,9, 26,3, 38,1, 44,3 мм и матрицы диаметром 21, 25,5, 29, 31,8, 38,9, 46,9 мм. Вытяжке подвергались стальные (сталь 08кп ВГ) и медные заготовки толщиной 1,5, 1,2 и 1,0 мм и диаметром 68 мм. Для эксперимента использовались следующие материалы:

- для антифрикционного покрытия – композиционный материал на основе порошка меди с добавлением графита (2-4 %);
- для промежуточного слоя – композит на основе железа с добавлением меди (15-20 %).

На первых переходах вытяжки для уменьшения влияния гофрообразований на процесс было использовано специально разработанное прижимное устройство.

Сначала на предварительных переходах вытяжки получали полые заготовки диаметром 25 мм для последующего получения внутреннего металлического слоя и диаметром 31 мм для получения наружного металлического слоя.

Далее для изготовления готового полого многослойного изделия использовались пуансон диаметром 19 мм и две матрицы диаметрами 22 и 25,5 мм.

Сначала на штамп устанавливались пуансон и матрица диаметрами 19 и 22 мм соответственно, и производилась вытяжка металлической заготовки внутреннего слоя с антифрикционным покрытием.

После этого, не снимая полученный «колпачок» с пуансона, матрица диаметрами 22 мм была заменена на матрицу диаметром 25,5 мм.

Затем заготовка диаметром 31 мм устанавливалась в матрицу с рабочим отверстием диаметром 25 мм и производилась вытяжка металлической заготовки наружного слоя с промежуточным металлопорошковым слоем.

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** Порошок припрессовывается к стенкам заготовки за счет уменьшения зазора между пуансоном и стенками заготовки при втягивании ее в отверстие матрицы. При холодной припрессовке металлического порошка к металлическому материалу практически невозможно достигнуть надежного сцепления покрытия с основой. Для получения хорошего и надежного покрытия применяется операция спекания. Спекание покрытия производилось в печи, в защитной среде  $\text{CO}_2$  при температуре 970 °С в течении 20-40 мин.

Для экспериментального определения работы деформации промежуточного порошкового слоя была произведена вытяжка наружного металлического слоя диамет-

ром 31 мм без порошка. Одновременно на самописце универсальной испытательной машины был получен график зависимости усилия вытяжки  $P$  от высоты вытянутого изделия  $x$ . Затем, при тех же условиях, произвели вытяжку другой аналогичной металлической заготовки с металлопорошковым слоем, и так же произвели запись усилия деформирования (рис. 2). Работу деформации металлопорошкового слоя определяли как разность площадей ограниченных кривыми усилия деформирования умноженную на масштабный коэффициент ( $\nu = 500 \text{ Н/мм}$ ).

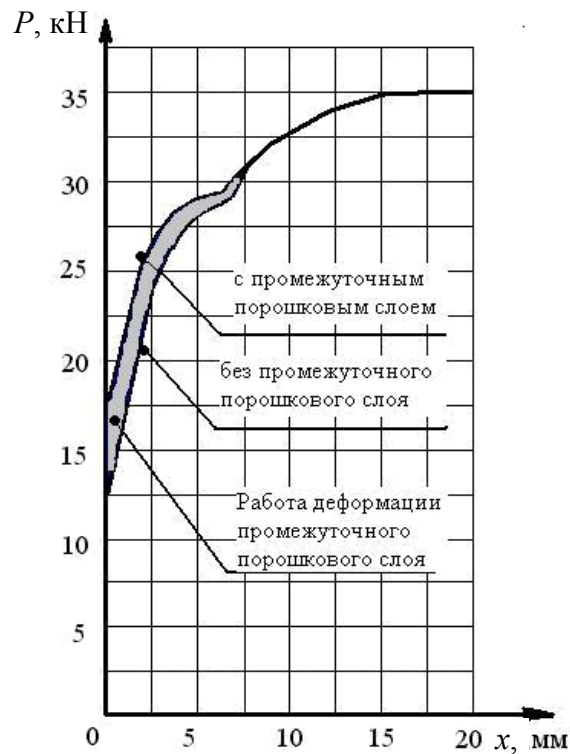


Рис. 2. Графики усилия деформирования металлической заготовки толщиной 1,5 мм без промежуточного порошкового слоя и с порошковым слоем:  $X$  – высота вытянутой заготовки. Толщина полученного порошкового слоя 0,1 мм

При толщине порошкового слоя  $hn = 0,1$  мм значение работы деформации составило:  $A \approx 24000 \text{ Н} \cdot \text{мм} = 24 \text{ Дж}$ .

Значение этой же работы, рассчитанной по формулам, выведенным выше, составляет  $22\,250 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ . Погрешность вычислений составила 7,8 %.

**Выводы и заключения.** Получены аналитические зависимости для определения работы пластической деформации порошкового слоя, усилия вытяжки, давления в порошковом слое и величины сдвигающего напряжения на границе между порошковым и металлическими слоями при их совместной вытяжке. Экспериментальная проверка свидетельствует о возможности рекомендовать их для практического применения.

### Список литературы

1. Добровольский И.Г., Любимов В.И. Прогрессивные процессы обработки материалов давлением. – Мн.: ДизайнПРО, 1996. – Ч. 1. – С. 37-60.
2. Патент Республики Беларусь № 3933 от 25.05.98 г. Способ изготовления композиционного полого изделия.

3. Стрикель Н.И., Бобарикин Ю.Л., Лискович М.И. Анализ напряженного состояния при совместной вытяжке покрытия и основы //Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2000. – № 2. – С. 5-14.
4. Сторожев А.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1971.
5. Степаненко А.В., Исаевич Л.А. Непрерывное формирование металлических порошков и гранул /Под ред. Ждановича. – Мн.: Наука и техника, 1980. – 256 с.
6. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. /Под ред. А.Д. Матвеева; Ред. Совет Е.И. Семенов и др. – М.: Машиностроение, 1987. – Т. 4: Листовая штамповка.

*Получено 25.02.2002 г.*