

УДК 621.762

АНАЛИЗ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ СОВМЕСТНОЙ ВЫТЯЖКЕ ПОКРЫТИЯ И ОСНОВЫ

Н.И. СТРИКЕЛЬ, Ю.Л. БОБАРИКИН, М.И. ЛИСКОВИЧ

*Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Введение. По сравнению с традиционными технологиями, теории которых посвящено много разработок, принципиально отличающиеся от них новые технологические процессы и схемы нуждаются в соответствующем развитии теоретических представлений.

Одним из таких новых технологических процессов является нанесение покрытий из порошков на основе металлов на листовые полые металлические заготовки при вытяжке [1].

Целью исследования является разработка теории напряжённого состояния совместной вытяжки основы и покрытия, так как именно напряжённое состояние в очаге деформации является определяющим фактором, от которого зависит прочность соединения покрытия с основой и эксплуатационные характеристики изделий.

Задачами исследования являются: определение зависимости контактных напряжений на границе между материалом покрытия и основой от степени деформации порошка; зависимости напряжений в материале основы от степени деформации основы и степени деформации порошка; зависимости величины усилия совместной вытяжки от основных параметров процесса.

Нормальные и касательные напряжения на границе между материалом покрытия и основой, а также между пуансоном и материалом покрытия вместе с величиной степени деформации порошка, определяют конечную относительную пористость покрытия, прочность соединения покрытия с основой и основные физико-механические характеристики и эксплуатационные свойства покрытия.

Величины напряжений в материале основы определяют предельную степень деформации основы и требуемое количество переходов.

Величина усилия совместной деформации определяет подбор оборудования, энергетические затраты и силовой расчёт инструмента.

Постановка задачи. Принимая во внимание то обстоятельство, что изменение геометрических размеров и степени деформации металлической основы при совместной вытяжке полностью определяются конструкцией инструмента и величиной взаимного перемещения пуансона и матрицы, а деформация порошка, в свою очередь, определяется воздействием жёсткого пуансона и деформируемой металлической основы, процесс совместной вытяжки можно условно расчленить на два синхронных и взаимосвязанных процесса, рассматривая каждый из них отдельно с учётом степени взаимного влияния: деформацию порошка и деформацию основы.

Рассмотрим схему процесса совместной вытяжки металлической заготовки 2 и порошка 3 с помощью матрицы 1 и пуансона 4 (см. рис. 1). Для анализа напряжённого состояния материала порошка выделим в очаге деформации бесконечно малый элемент (рис. 2) высотой dz и толщиной h_z , средний диаметр которого D_z , и обозначим действующие напряжения: p – нормальные контактные напряжения на границе между основой и порошком и на границе между пуансоном и порошком; τ_0 и τ_n –

касательные контактные напряжения на границах основа – порошок и пуансон – порошок; σ_z и $\sigma_z + d\sigma_z$ – нормальные напряжения в выделенных сечениях элемента (рис. 2).

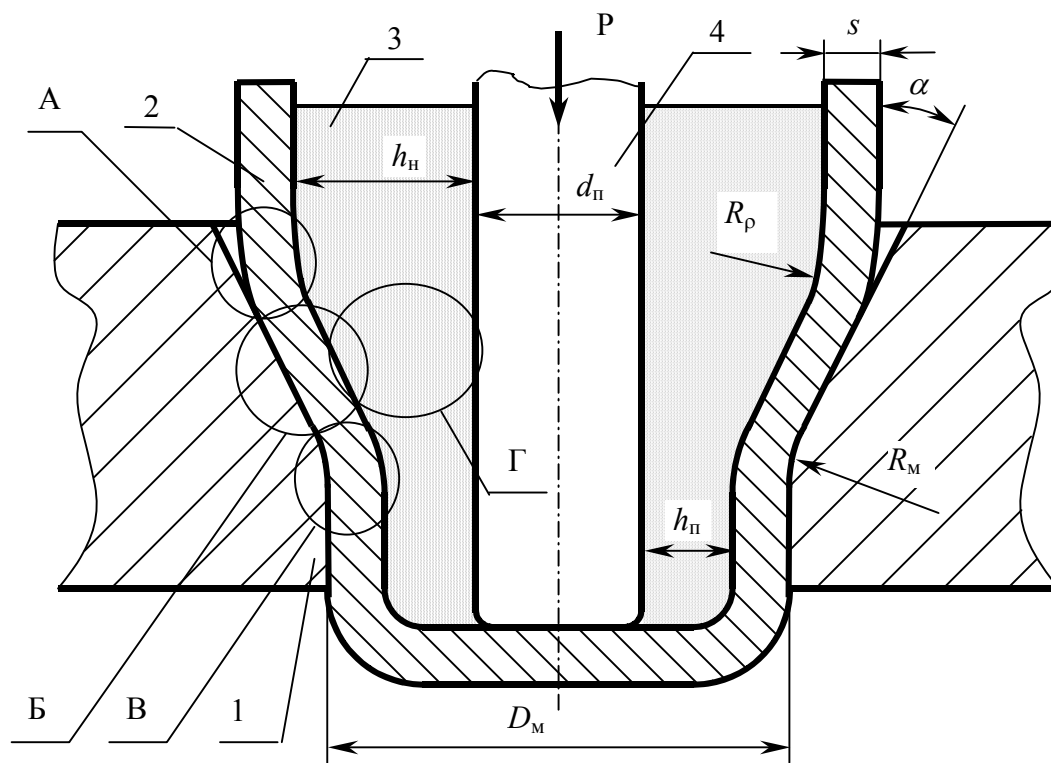


Рис. 1. Схема процесса совместной вытяжки покрытия и основы: 1- матрица; 2-металлическая основа; 3 - порошок; 4- пуансон.

Расчёт напряжений p и τ_0 будем производить, решая совместно дифференциальное уравнение условия равновесия выделенного элемента и уравнение условия пластичности.

Теория процесса осесимметричной вытяжки листового металла разработана в достаточной степени. Наиболее обстоятельно напряжённое состояние при листовой вытяжке в различных участках очага деформации изучено Е.А. Поповым [2,3]. Это позволяет использовать методику и расчётные зависимости, полученные Е.А. Поповым, для описания процесса вытяжки металлической листовой основы, дополняя и видоизменяя их, если это будет необходимо, таким образом, чтобы сделать возможным учёт влияния процесса деформации порошкового материала на процесс деформации основы.

Разделим очаг деформации основы на три участка так же, как это сделано в [2] (см. рис. 1): “А” - участок перехода цилиндрической части заготовки основы в коническую; “Б” - участок конической части; “В” - участок перехода конической части в цилиндрическую часть изделия.

На участке “А” воздействием порошкового материала пренебрегаем, рассматривая только процесс пластического изгиба при переходе цилиндрической части заготовки основы в коническую. На участке “Б” будем рассматривать процесс свёртывания полый основы на конической матрице с дополнительным давлением на основу со стороны порошкового материала. На участке “В” будем рассматривать процесс пла-

стического изгиба при переходе конической части основы в цилиндрическую часть изделия.

Усилие совместной вытяжки будем определять в следующем виде:

$$P = y_{c_{\text{MAX}}} \cdot p \cdot (D_M - s) \cdot s + P_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где первое слагаемое учитывает величину усилия, необходимого для вытяжки основы, с учётом влияния давления и сил трения со стороны порошка;

$y_{c_{\text{MAX}}}$ – максимальное растягивающее напряжение, действующее в материале основы в осевом направлении в месте окончания участка “В”, которое будем определять последовательным расчётом напряжений в основе, начиная с участка “А” и заканчивая участком “В”;

D_M – диаметр цилиндрического отверстия в матрице;

s – толщина материала основы;

$P_{\text{тр}}$ – усилие, затрачиваемое на трение порошка по пуансону.

Напряжения на поверхности контакта покрытия с основой. Рассмотрим процесс совместной вытяжки металлической основы и порошкового покрытия, используя принцип подхода и терминологию, применяемую А.В. Степаненко и Л.А. Исаевичем [4].

Выделим в очаге деформации порошка бесконечно малый элемент (см. рис. 2). Условие равновесия выделенного элемента требует, чтобы сумма сил, приложенных к элементу в осевом направлении, была равна нулю. Это значит, что:

$$p \cdot p \cdot D_z \cdot dz \cdot \text{tg} \alpha - (y_z \cdot dh_z + h_z \cdot dy_z) \cdot p \cdot D_z - (f_0 + f_{\text{II}}) \cdot p \cdot D_z \cdot dz = 0, \quad (2)$$

где α – угол наклона рабочей поверхности матрицы к вертикали; $dh_z = \text{tg} \alpha \cdot dz$.

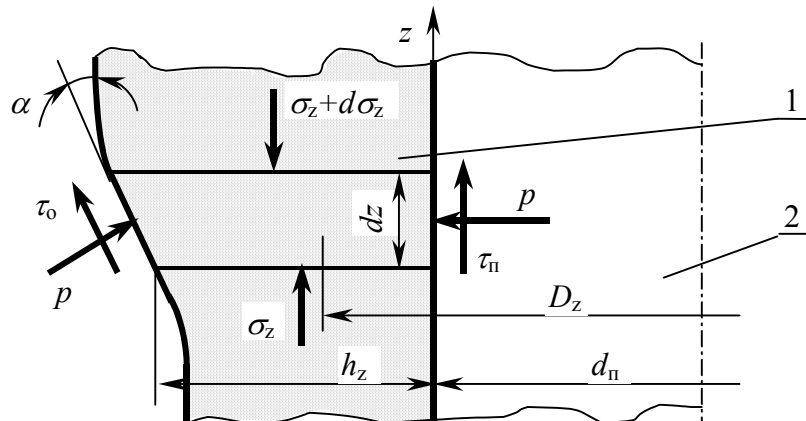


Рис. 2. Схема выделенного элемента материала порошка: 1- порошковый состав; 2- пуансон.

Примем соотношения между τ и p в следующем виде:

$$\tau_0 = f_0 \cdot p, \quad (3)$$

$$\tau_{\text{II}} = f_{\text{II}} \cdot p, \quad (4)$$

где f_0 - коэффициент контактного трения порошка по основе;

f_{II} - коэффициент контактного трения порошка по пуансону.

Упрощаем выражение (2): вместо dz , приняв $\frac{dh_z}{\text{tg} \alpha}$, сокращая величину $p \cdot D_z$,

разделяя на h_z и изменяя знак, а также используя (3) и (4), получим дифференциальное уравнение следующего вида:

$$d\sigma_z - (p - \sigma_z) \cdot \frac{dh_z}{h_z} - \frac{f_0 + f_{\text{II}}}{\text{tg} \alpha} \cdot p \cdot \frac{dh_z}{h_z} = 0. \quad (5)$$

Отметим, что это дифференциальное уравнение отличается от используемого А.В. Степаненко и Л.А. Исаевичем [4] исходного дифференциального уравнения при выводе уравнения для расчета давления деформируемого порошка на инструмент при прокатке только постоянным коэффициентом. В нашем случае этот коэффициент:

$$\delta = \frac{f_0 + f_{II}}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (6)$$

а у А.В. Степаненко и Л.А. Исаевича:

$$\delta = \frac{f}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_p}{2}}, \quad (7)$$

где f - коэффициент контактного трения порошка по валку;

α_p - угол прокатки.

Если принять во внимание то обстоятельство, что при анализе процесса прокатки дугу контакта валка с порошком А.В. Степаненко и Л.А. Исаевич [4] заменили хордой, проходящей под углом $\frac{\alpha_p}{2}$ к оси прокатки, а в нашем случае этому углу $\frac{\alpha_p}{2}$

соответствует угол α - угол наклона рабочей поверхности матрицы к оси вытяжки, расположенной вертикально, то знаменатели правых частей в формулах (6) и (7) имеют близкий физический смысл, характеризую тангенс угла наклона рабочей поверхности инструмента к оси деформируемой заготовки.

Различие в числителях правых частей формул (6) и (7) объясняется наличием в нашем случае дополнительной поверхности трения порошка по пуансону. Совпадение было бы полным, если бы отсутствовал пуансон. Это значит, что коэффициенты δ , определённые по формулам (6) и (7), имеют близкий физический смысл, характеризую отношение суммы коэффициентов трения при двух поверхностях трения или одного коэффициента трения при одной поверхности трения к тангенсу угла наклона рабочей поверхности инструмента к оси деформируемой заготовки.

Близкий физический смысл коэффициентов позволяет применить разработанные А.В. Степаненко и Л.А. Исаевичем хорошо согласующиеся с экспериментом расчетные формулы для определения напряжений в зоне соединяемых поверхностей основы и покрытия при вытяжке.

Формулы эти получены в работе [4] при следующих допущениях.

Условие пластичности имеет вид:

$$p - \sigma_z = \beta \cdot \sigma_{cp}, \quad (8)$$

где β - коэффициент изменяется в пределах $1 \leq \beta \leq 1,15$, для плоскодеформированного состояния $\beta=1,15$, для осесимметричного состояния $\beta=1$, [2] стр. 130-132;

σ_{cp} - фактическое сопротивление деформации порошкового материала.

Использованное в работе [4] усредненное сопротивление деформации металлической составляющей упрочняемого порошка, применительно к нашим условиям, может быть записано в виде:

$$\sigma_{TC} = \sigma_s + \frac{\theta_{II} \cdot a_M \cdot (h_H - h_{II})^n}{2 \cdot h_{II}^n}, \quad (9)$$

где σ_s - сопротивление деформации металлической составляющей порошка пластической деформации в состоянии поставки;

θ_n - относительная плотность пористого покрытия;

h_H – начальная толщина порошкового слоя;
 h_{II} – конечная толщина покрытия;
 a_M и n – эмпирические коэффициенты для определения сопротивления деформации металла, упрочняемого в результате наклепа, принимая, что металлическая составляющая порошковых тел упрочняется по степенной зависимости:

$$\sigma_S = \sigma_T + a_M \cdot \varepsilon^n, \quad (10)$$

где σ_T – предел текучести металлической составляющей порошкового тела;

ε – степень деформации металлической составляющей порошкового тела.

Значения a_M и n для различных металлов приведены в [5].

Для учёта изменения предела текучести пористого материала, в зависимости от его пористости, А. В. Степаненко и Л. А. Исаевич [4] используют степенную зависимость

$$\sigma_{CP} = \left(\frac{h_{II} \cdot \theta_{II}}{h_Z} \right)^m \sigma_{TC}, \quad (11)$$

где величина m – показатель степени по данным Мусихина А. М. [6], для порошков пластичных металлов принимает значения в зависимости от вида металла от 3 до 5. По результатам опытов для порошкового железа $m \approx 3$ [6].

Преобразованное в работе [4] условие пластичности, применительно к нашим условиям, может быть записано в следующем виде:

$$p - \sigma_Z = \beta \cdot \left(\frac{h_{II} \cdot \theta_{II}}{h_Z} \right)^m \sigma_{TC}. \quad (12)$$

Полученная в работе [4], после интегрирования условия равновесия совместно с условием пластичности, использованием граничных условий формула для определения давления порошка на инструмент может быть представлена применительно к условиям совместной вытяжки в виде следующей расчетной зависимости:

$$p = \beta \cdot \left(\frac{h_{II} \cdot \theta_{II}}{h_H} \right)^m \cdot \left[\left(\sigma_S + \sigma_{TC} \frac{(m-1) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_{II} - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) \left(\frac{h_H}{h_Z} \right)^\delta - \sigma_{TC} \frac{(m-1) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_{II} - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \left(\frac{h_H}{h_Z} \right)^m \right], \quad (13)$$

где δ – коэффициент, взятый по формуле (6).

Обозначим величину в квадратных скобках формулы (13) следующим образом:

$$A_Z = \left[\left(\sigma_S + \sigma_{TC} \frac{(m-1) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_{II} - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) \left(\frac{h_H}{h_Z} \right)^\delta - \sigma_{TC} \frac{(m-1) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{f_o + f_{II} - m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \left(\frac{h_H}{h_Z} \right)^m \right]. \quad (14)$$

В очаге деформации отношение $\frac{h_H}{h_Z}$ меняется в интервале:

$$1 \leq \frac{h_H}{h_Z} \leq \frac{h_H}{h_{II}}. \quad (15)$$

Вначале очага на границе с недеформированным участком отношение $\frac{h_H}{h_Z} = 1$ и величина p , определённая по формуле (13), будет минимальна и равна:

$$p = \beta \cdot \left(\frac{h_{\Pi} \cdot \theta_{\Pi}}{h_{\text{H}}} \right)^m \cdot \sigma_{\text{S}}. \quad (16)$$

При переходе с конического в цилиндрический деформированный участок отношение $\frac{h_{\text{H}}}{h_z} = \frac{h_{\text{H}}}{h_{\Pi}}$ и нормальное контактное напряжение p примет максимальное значение:

$$p_{\text{MAX}} = \beta \cdot \left(\frac{h_{\Pi} \cdot \theta_{\Pi}}{h_{\text{H}}} \right)^m \cdot \left[\left(\sigma_{\text{S}} + \sigma_{\text{TC}} \frac{(m-1) \cdot \text{tg} \alpha}{f_{\text{O}} + f_{\Pi} - m \cdot \text{tg} \alpha} \right) \left(\frac{h_{\text{H}}}{h_{\Pi}} \right)^{\delta} - \sigma_{\text{TC}} \frac{(m-1) \cdot \text{tg} \alpha}{f_{\text{O}} + f_{\Pi} - m \cdot \text{tg} \alpha} \left(\frac{h_{\text{H}}}{h_{\Pi}} \right)^m \right]. \quad (17)$$

Обозначим величину в квадратных скобках следующим образом:

$$A_{\Pi} = \left[\left(\sigma_{\text{S}} + \sigma_{\text{TC}} \frac{(m-1) \cdot \text{tg} \alpha}{f_{\text{O}} + f_{\Pi} - m \cdot \text{tg} \alpha} \right) \left(\frac{h_{\text{H}}}{h_{\Pi}} \right)^{\delta} - \sigma_{\text{TC}} \frac{(m-1) \cdot \text{tg} \alpha}{f_{\text{O}} + f_{\Pi} - m \cdot \text{tg} \alpha} \left(\frac{h_{\text{H}}}{h_{\Pi}} \right)^m \right]. \quad (18)$$

В зоне соединяемых поверхностей действует наряду с нормальным напряжением p и касательное напряжение:

$$\tau_{\text{O}} = f_{\text{O}} \cdot \beta \cdot \left(\frac{h_{\Pi} \cdot \theta_{\Pi}}{h_{\text{H}}} \right)^m \cdot A_z. \quad (19)$$

Максимальное касательное напряжение будет при $h_z = h_{\Pi}$:

$$\tau_{\text{O MAX}} = f_{\text{O}} \cdot \beta \cdot \left(\frac{h_{\Pi} \cdot \theta_{\Pi}}{h_{\text{H}}} \right)^m \cdot A_{\Pi}. \quad (20)$$

Полное напряжение в зоне соединяемых поверхностей основы и покрытия:

$$\sigma_{\text{ПОЛН}} = \beta \cdot \sqrt{1 + f_{\text{O}}^2} \cdot \left(\frac{h_{\Pi} \cdot \theta_{\Pi}}{h_{\text{H}}} \right)^m \cdot A_z. \quad (21)$$

Характер его изменения подобен изменению нормального напряжения p . Все рассмотренные параметры в той же степени влияют на $\sigma_{\text{ПОЛН}}$, как и на p .

Максимальное полное напряжение в зоне соединяемых поверхностей основы и покрытия может быть определено по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{ПОЛН MAX}} = \beta \cdot \sqrt{1 + f_{\text{O}}^2} \cdot \left(\frac{h_{\Pi} \cdot \theta_{\Pi}}{h_{\text{H}}} \right)^m \cdot A_z. \quad (22)$$

Таким образом, полученные зависимости (13), (17) - (22) позволяют определить напряжения в зоне соединяемых поверхностей основы и покрытия при вытяжке, выяснить характер изменения этих напряжений в очаге деформации, минимальные и максимальные значения.

В эти зависимости входят следующие факторы, существенно влияющие на силовые параметры совместной вытяжки покрытия и основы:

- степень деформации порошка, характеризуемая отношением $\frac{h_{\text{H}}}{h_{\Pi}}$;
- предел текучести σ_{T} металлической составляющей порошкового тела;

- степень упрочнения металлической составляющей порошкового тела, характеризующая коэффициентами a_m и n ;
- относительная плотность пористого покрытия - θ_n ;
- угол наклона рабочей поверхности матрицы к вертикали - α ;
- коэффициенты трения порошка по основе и по пуансону - f_o и f_n , соответственно;
- величина показателя степени m , характеризующая изменение предела текучести пористого тела в зависимости от его пористости.

Напряжения в материале основы. Так как на участке “А” (см. рис. 1) перехода цилиндрической части заготовки металлической основы в коническую воздействием порошкового материала на процесс деформирования основы можно пренебречь, то для определения радиальных напряжений на этом участке σ_p можно использовать расчётные зависимости, приведенные в [2] на стр. 376:

$$y_c = y_{s_o} \cdot \ln \frac{R_3}{c} + \frac{y_{s_o} \cdot s}{4 \cdot R_c}, \quad (23)$$

где y_{s_o} – сопротивление материала основы пластическому деформированию;

ρ – текущий радиус (расстояние до оси симметрии) среднего слоя основы;

R_3 – радиус полой заготовки основы по среднему слою;

R_p – радиус кривизны срединной поверхности основы в меридианном сечении на участке “А” (см. рис. 3), для определения которого воспользуемся зависимостью, приведенной в [2] на стр. 355:

$$R_c = \frac{\sqrt{R_3 \cdot s}}{\sqrt{2} \cdot \sin \beta}. \quad (24)$$

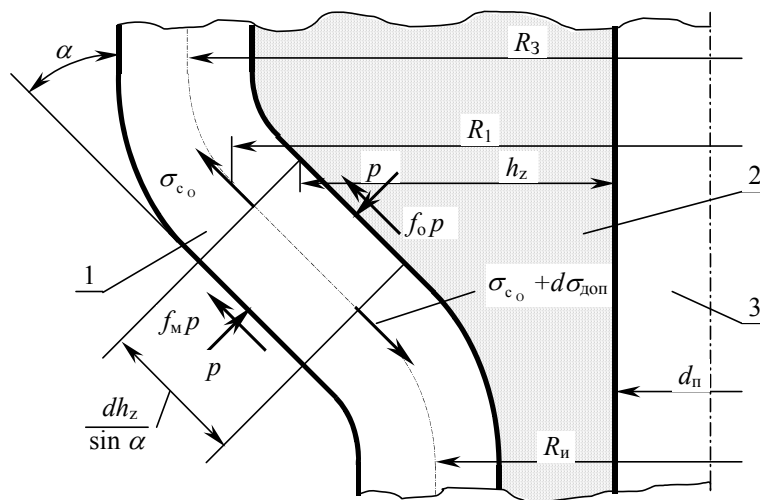


Рис. 3. Схема выделенного элемента основы: 1 – металлическая основа; 2 – порошковый состав; 3 – пуансон.

Если рассматривать только процесс вытяжки основы, то можно для расчёта y_{c_0} использовать формулу, приведенную в [2] на стр. 377:

$$y_{c_0} = y_{s_o} \left\{ \left(1 + \frac{\text{tg } \beta}{f_M} \right) \left[1 - \left(\frac{c}{R_1} \right)^{\frac{f_M}{\text{tg } \beta}} \right] + \left(\ln \frac{R_3}{R_1} + \frac{s}{2R_c} \right) \left(\frac{c}{R_1} \right)^{\frac{f_M}{\text{tg } \beta}} \right\}, \quad (25)$$

где f_M – коэффициент трения основы по матрице;

R_1 – радиус на границе между участками “А” и “Б”.

Величину R_1 определим, как

$$R_1 = R_3 - R_p (1 - \cos \alpha). \quad (26)$$

При совместной вытяжке радиальное напряжение будем определять по формуле:

$$y_c = y_{c_0} + y_{\text{доп}}, \quad (27)$$

где $\sigma_{\text{доп}}$ – дополнительное напряжение, необходимое на преодоление сил трения между порошком и основой, и дополнительных сил трения между основой и матрицей за счёт прижима основы и матрицы давлением P .

Рассмотрим равновесие кольцевого элемента основы толщиной s , шириной $\frac{dh_z}{\sin \bar{\sigma}}$ (см. рис. 3), на который действуют только дополнительное напряжение и силы трения.

Проектируя силы на направление движения элемента и пренебрегая бесконечно малыми высших порядков можно выразить величину $\sigma_{\text{доп}}$ следующим образом:

$$y_{\text{доп}} = \frac{f_0 + f_M}{s \cdot \sin \bar{\sigma}} \int_{h_H}^{h_Z} p dh_z. \quad (28)$$

Величину p – давления порошка на основу определим по расчётной зависимости (13).

Подставив величину p из (13) в (28) и используя также (6), после интегрирования получим:

$$y_{\text{доп}} = \frac{f_0 + f_M}{s \cdot \cos \bar{\sigma}} \left(\frac{h_{\Pi}}{h_H} \cdot u_{\Pi} \right)^m h_H \left\{ \left[y_s + y_{\text{TC}} \frac{(m-1) \cdot \text{tg } \bar{\sigma}}{f_0 + f_{\Pi} - m \cdot \text{tg } \bar{\sigma}} \right] \frac{1}{\text{tg } \bar{\sigma} - f_0 - f_{\Pi}} \times \right. \\ \left. \times \left[\left(\frac{h_H}{h_Z} \right)^{\frac{f_0 + f_{\Pi} - \text{tg } \bar{\sigma}}{\text{tg } \bar{\sigma}}} - 1 \right] + \frac{y_{\text{TC}}}{f_0 + f_{\Pi} - m \cdot \text{tg } \bar{\sigma}} \left[\left(\frac{h_H}{h_Z} \right)^{m-1} - 1 \right] \right\}. \quad (29)$$

Максимальное значение дополнительного радиального напряжения будет при $h_z = h_{\Pi}$:

$$y_{\text{доп MAX}} = \frac{f_0 + f_M}{s \cdot \cos \bar{\sigma}} \left(\frac{h_{\Pi}}{h_H} \cdot u_{\Pi} \right)^m h_H \left\{ \left[y_s + y_{\text{TC}} \frac{(m-1) \cdot \text{tg } \bar{\sigma}}{f_0 + f_{\Pi} - m \cdot \text{tg } \bar{\sigma}} \right] \frac{1}{\text{tg } \bar{\sigma} - f_0 - f_{\Pi}} \times \right. \\ \left. \times \left[\left(\frac{h_H}{h_{\Pi}} \right)^{\frac{f_0 + f_{\Pi} - \text{tg } \bar{\sigma}}{\text{tg } \bar{\sigma}}} - 1 \right] + \frac{y_{\text{TC}}}{f_0 + f_{\Pi} - m \cdot \text{tg } \bar{\sigma}} \left[\left(\frac{h_H}{h_{\Pi}} \right)^{m-1} - 1 \right] \right\}. \quad (30)$$

Максимальное растягивающее напряжение в материале основы при совместной вытяжке определим, используя аналогичную зависимость, приведенную в [2] на стр. 377 с учетом $y_{\text{доп MAX}}$:

$$y_{c_{\text{MAX}}} = y_{S_0} \left\{ \left(1 + \frac{\text{tg } \bar{\sigma}}{f_M} \right) \left[1 - \left(\frac{R_{\Pi}}{R_1} \right)^{\frac{f_M}{\text{tg } \bar{\sigma}}} \right] + \left(\ln \frac{R_3}{R_1} + \frac{s}{2R_c} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{R_{\Pi}}{R_1} \right)^{\frac{f_M}{\text{tg } \bar{\sigma}}} + \frac{s}{2R_1 + s} + \frac{y_{\text{доп MAX}}}{y_{S_0}} \right\} e^{f_M \bar{\sigma}}, \quad (31)$$

где $R_{И}$ – радиус основы в изделии:

$$R_{И} = \frac{D_M - s}{2}. \quad (32)$$

Радиус заготовки основы можно выразить через её наружный диаметр:

$$R_3 = \frac{D_0 - s}{2}, \quad (33)$$

где D_0 – наружный диаметр заготовки основы.

Усилие совместной вытяжки. Величину дополнительного усилия $P_{ТР}$, которое нужно приложить со стороны пуансона, чтобы преодолеть силы трения порошка по пуансону, можно представить следующим образом:

$$P_{ТР} = \frac{p \cdot f_{\Pi} \cdot d_{\Pi}}{\sin \bar{\sigma}} \int_{h_{И}}^{h_{\Pi}} p \, dh_z, \quad (34)$$

где d_{Π} – диаметр пуансона.

Подставив в (34) значение p из (13), получим после интегрирования:

$$P_{ТР} = \frac{p \cdot f_{\Pi} \cdot d_{\Pi}}{\cos \bar{\sigma}} \left(\frac{h_{\Pi}}{h_{И}} \cdot u_{\Pi} \right)^m h_{И} \left\{ \left[y_s + y_{TC} \frac{(m-1) \cdot \text{tg } \bar{\sigma}}{f_0 + f_{\Pi} - m \cdot \text{tg } \bar{\sigma}} \right] \frac{1}{\text{tg } \bar{\sigma} - f_0 - f_{\Pi}} \times \right. \\ \left. \times \left[\left(\frac{h_{И}}{h_{\Pi}} \right)^{\frac{f_0 + f_{\Pi} - \text{tg } \bar{\sigma}}{\text{tg } \bar{\sigma}}} - 1 \right] + \frac{y_{TC}}{f_0 + f_{\Pi} - m \cdot \text{tg } \bar{\sigma}} \left[\left(\frac{h_{И}}{h_{\Pi}} \right)^{m-1} - 1 \right] \right\}. \quad (35)$$

Подставив в (1) значение $y_{c_{\text{MAX}}}$ из (31) и значение $P_{ТР}$ из (35), получим формулу для расчёта усилия совместной вытяжки:

$$P = p \cdot (D_M - s) \cdot s \cdot y_{S_0} \left\{ \left(1 + \frac{\text{tg } \bar{\sigma}}{f_M} \right) \left[1 - \left(\frac{R_{И}}{R_1} \right)^{\frac{f_M}{\text{tg } \bar{\sigma}}} \right] + \left(\ln \frac{R_3}{R_1} + \frac{s}{2R_c} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{R_{И}}{R_1} \right)^{\frac{f_M}{\text{tg } \bar{\sigma}}} + \frac{s}{2R_M + s} + \frac{y_{\text{ДОП_MAX}}}{y_{S_0}} \right\} e^{f_M \bar{\sigma}} + \frac{p \cdot f_{\Pi} \cdot d_{\Pi}}{\cos \bar{\sigma}} \cdot \left(\frac{h_{\Pi}}{h_{И}} \cdot x_{\Pi} \right)^m \times \\ \times \left\{ \left[y_s + y_{TC} \frac{(m-1) \cdot \text{tg } \bar{\sigma}}{f_0 + f_{\Pi} - m \cdot \text{tg } \bar{\sigma}} \right] \frac{1}{\text{tg } \bar{\sigma} - f_0 - f_{\Pi}} \left[\left(\frac{h_{И}}{h_{\Pi}} \right)^{\frac{f_0 + f_{\Pi} - \text{tg } \bar{\sigma}}{\text{tg } \bar{\sigma}}} - 1 \right] + \right. \\ \left. + \frac{y_{TC}}{f_0 + f_{\Pi} - m \cdot \text{tg } \bar{\sigma}} \left[\left(\frac{h_{И}}{h_{\Pi}} \right)^{m-1} - 1 \right] \right\}. \quad (36)$$

В таблице 1 приведены опытные и расчётные значения величины усилия совместной вытяжки, а также другие параметры процесса, полученные при различных величинах толщин покрытия. Покрытие наносилось на полые стальные (сталь 08кпВГ) заготовки с толщиной стенки 1,1 и 1,4 мм. В качестве материала наносимого покрытия использовался порошковый состав ЖГр3 (97% железа и 3% графита). Некоторая

неравномерность усилия обусловлена различием механических свойств материала основы и её толщины.

Таблица 1

Результаты теоретического анализа и опытные данные

Относительное обжатие порошка, h_n/h_n	-	19,50	4,33	4,70	2,03
Конечная толщина покрытия, h_n	м	$0,10 \cdot 10^{-3}$	$0,45 \cdot 10^{-3}$	$0,50 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$
Относительная плотность покрытия, θ_n	-	0,688	0,854	0,655	0,693
Расчётное усилие, P	кН	2449	1560	2414	2347
Экспериментальное усилие, P	кН	2837	1845	2417	2333

Сопоставление расчётных и экспериментальных данных с помощью непараметрического U-критерия Уилкоксона, Манна и Уитни [7] показало, что нуль-гипотеза о принадлежности двух рядов к одной и той же генеральной совокупности не отвергается при уровнях значимости, не превышающих 0,10, что свидетельствует о возможности использования полученной аналитической зависимости в практических расчётах.

Выводы и заключения. Таким образом, проведенный анализ напряжённого состояния процесса совместной пластической деформации покрытия и основы при вытяжке позволил получить расчётные зависимости для определения нормальных и касательных напряжений на границе материала покрытия и основы, выявить факторы, влияющие на величину этих напряжений, пористость и свойства изделий, определить расчётную зависимость для нахождения величины растягивающего напряжения в материале основы, а также усилия совместной вытяжки. Рассчитаны и определены экспериментально величины усилий совместной вытяжки, критериальное сравнение которых свидетельствует о приемлемом совпадении результатов.

Литература

1. Стрикель Н.И., Бобарикин Ю.Л., Лискович М. И. Сменные композиционные втулки подшипников скольжения. Современные проблемы машиноведения: Материалы МНТК.- Гомель, 1998.-Т.2.- С.179-180.
2. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением.- М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.
3. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки.- М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
4. Степаненко А.В., Исаевич Л.А. Непрерывное формирование металлических порошков и гранул / Под ред. Ждановича. – Мн.: Наука и техника, 1980. – 256 с.
5. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: Справочник. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.:Металлургия, 1973. - 224 с.
6. Мусихин А. М. Напряжения в очаге деформации при холодной прокатке пористых металлов // Порошковая металлургия.- 1977.- №12.- С.32.
7. Мюллер П. и др. Таблицы по математической статистике / П. Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм; Пер. с нем. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 278 с.