

УДК 621.777:621.79

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОКРЫТИЯ В ПРОЦЕССЕ ВОЛОЧЕНИЯ

А. Т. БЕЛЬСКИЙ, Н. В. ИНОЗЕМЦЕВА

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

Ключевые слова: деформация, напряжение, металлические порошковые покрытия, волочение.

Введение

Способы нанесения металлических порошковых покрытий на металлическую основу в технологиях плакирования методом совместной пластической деформации основы и порошка покрытия отличаются высокопроизводительностью и обеспечивают получение слоистых материалов. Совместная пластическая деформация реализуется с помощью операций обработки металлов давлением, таких как обратное выдавливание, прокатка и волочение.

В работе [1] приводятся схемы формирования покрытий на основе с помощью применения металлических порошков в процессе их совместной пластической деформации, выявлены закономерности образования соединения между металлической основой и порошковым покрытием на стадии их совместной пластической деформации, выраженные через технологические параметры. Создание нормальных контактных напряжений обеспечивает получение качественного соединения между соединяемыми слоями, а также получение качественного покрытия. Поэтому их анализ является актуальным. Анализ напряженного состояния очага деформации при формировании покрытия в процессе обратного выдавливания и прокатки приведен в работах [2], [3]. В данных работах получены аналитические зависимости, позволяющие определять напряжения непосредственно в очаге деформации при обратном выдавливании [2] и прокатке [3].

Стадии формирования покрытия при волочении. При нанесении покрытия на длинномерное изделие в процессе волочения металлический порошок, из которого формируется защитный слой, из сыпучей среды постепенно превращается в жесткое тело, обладающее упругостью и механической прочностью. При этом он претерпевает четыре стадии деформации: без изменения плотности, с изменением плотности, с изменением объема и с изменением компактной среды.

Разработанный узел формирования покрытия позволяет получить у входа в рабочий конус волокна плотность порошка металла, равную плотности утряски. Принимая это во внимание, считаем, что дальнейшее его перемещение осуществляется слоями, т. е. отсутствует перемещение отдельных частиц порошка металла друг относительно друга. На основании этого рабочий конус волокна можно разбить на три участка (рис. 1).

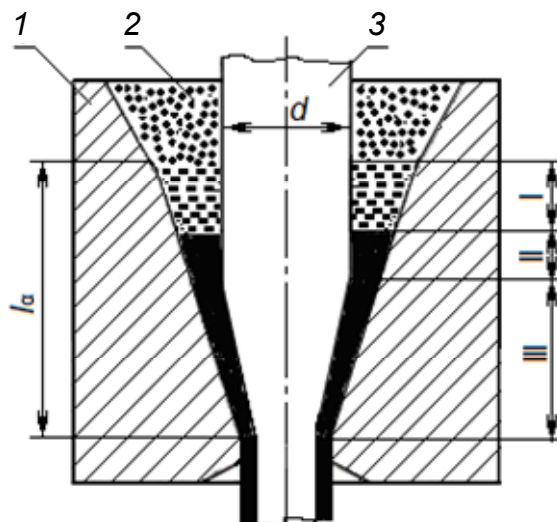


Рис. 1. Схема формирования покрытия из порошка металла при волочении:
1 – волока; 2 – порошок; 3 – проволока

На первом участке происходит увеличение плотности порошка металла от состояния утряски до состояния компактного металла. На втором участке происходит деформация формируемого покрытия. В конце второго участка напряжение в сердечнике достигает предела текучести. На третьем участке происходит совместная деформация как покрытия, так и сердечника, что приводит к соединению металла покрытия с металлом сердечника в холодном состоянии.

Согласно работам [4], [5], наибольшая интенсивность деформации формируется в конусной части волоки на первом участке. На втором и третьем участках наблюдается уменьшение интенсивности деформации.

Целью настоящей работы является получение аналитических зависимостей для напряжений на первом участке формирования покрытия в процессе волочения.

Расчет напряжений, действующих на первом участке. Считаем, что пористость равномерно распределена по объему порошка металла, плотность по ширине деформируемого покрытия одинаковая и уплотняемый материал является средой с однородной структурой. Такие допущения позволяют применить к порошку металла общие законы механики деформируемого тела.

Под действием силы трения, действующей со стороны проволоки на покрытие, в последнем возникает сжимающее продольное напряжение [4]. Выделим на первом участке кольцевой элемент покрытия толщиной dx (рис. 2).

Проектируя на ось волочения все силы, действующие на кольцевой элемент, получим уравнение равновесия в следующем виде:

$$\sigma_x A_x - (\sigma_x + d\sigma_x)(A_x - dA_x) + \tau_2 \pi d dx - \tau_1 (D_x - 0,5dD_x) \pi dx - p_{x1} (D_x - 0,5D_x) \pi \alpha dx = 0, \quad (1)$$

где σ_x – нормальное напряжение, действующее на покрытие; A_x – площадь кольцевого элемента в сечении x ; τ_2 – касательное напряжение, действующее между сердечником и порошковым покрытием; τ_1 – касательное напряжение, действующее между порошковым покрытием и стенкой волочильного инструмента; D_x, d – начальный и конечный диаметры выделенного кольцевого элемента.

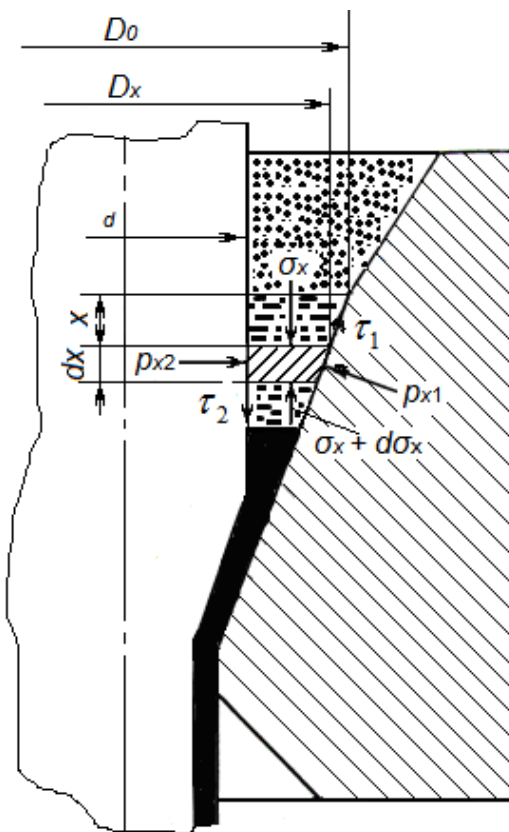


Рис. 2. Схема к составлению дифференциального уравнения равновесия элементарного покрытия кольцевой формы на первом участке

Учитывая, что:

$$dx = \frac{dD_x}{2 \operatorname{tg} \alpha}; \quad A_x = \frac{\pi}{4}(D_x^2 - d^2); \quad dA_x = \frac{\pi}{2} D_x dD_x, \quad \tau_1 = f_1 p_{x1}, \quad \tau_2 = 0,5 \sigma_\phi,$$

после преобразования уравнение (1) будет иметь вид:

$$\frac{d\sigma_x}{dD_x} - \sigma_x \frac{2D_x}{D_x^2 - d^2} + \sigma_\phi \frac{d}{\operatorname{tg} \alpha (D_x^2 - d^2)} - p_{x1} \frac{2D_x}{D_x^2 - d^2} \left(\frac{f_1}{\operatorname{tg} \alpha} + 1 \right) = 0, \quad (2)$$

где f_1 – коэффициент трения между материалом порошка и материалом волокна; σ_ϕ – фактический предел текучести порошкового материала.

Заменяя p_{x1} выражением $p_x / (1 - \operatorname{tg} \alpha)$, а также, согласно [5], с некоторым допущением, считая, что

$$\frac{d}{D_x} \approx \frac{d}{D_{cp}},$$

уравнение (2) преобразуется как

$$\frac{d\sigma_x}{dD_x} - \sigma_x \frac{2D_x}{D_x^2 - d^2} + \sigma_\phi \frac{D_x d}{\operatorname{tg} \alpha (D_x^2 - d^2) D_{cp}} - p_x \frac{2D_x (f_1 + \operatorname{tg} \alpha)}{(D_x^2 - d^2) \operatorname{tg} \alpha (1 - f_1 \operatorname{tg} \alpha)} = 0, \quad (3)$$

где D_{cp} – средний диаметр рабочего конуса волокна.

Соотношение между контактным давлением p_x и средним продольным напряжением σ_x запишем в соответствии с упрощенным условием пластического течения осесимметричных тел [4]:

$$p_x = n_\beta \sigma_\phi + \sigma_x, \quad (4)$$

где n_β – коэффициент Лодэ.

Если в качестве основной характеристики механических свойств деформируемого пористого тела принять переменное значение предела текучести σ_{tv} , то в общем случае при нанесении покрытия в процессе волочения с использованием порошков для них, как и для компактного металла, можно записать:

$$\sigma_\phi = n_t n_v \sigma_{tv}, \quad (5)$$

где n_t, n_v – коэффициенты, учитывающие соответственно влияние температуры и скорости.

А. М. Мусихин [6], анализируя характер изменения физико-механических характеристик пористых материалов в результате обжаривания их валками при прокатке, установил, что изменение предела текучести порошков пластичных металлов может быть выражено соотношением

$$\sigma_{tv} = \sigma_{tx} \upsilon_x^m, \quad (6)$$

где σ_{tx} – предел текучести металлической составляющей; υ_x – относительная плотность сыпучего материала в произвольном сечении очага уплотнения и деформации; m – показатель, который для порошкообразного материала изменяется от 3 до 5.

Металлическая составляющая порошковых материалов от относительного обжаривания упрочняется по следующей зависимости [7]:

$$\sigma_{tx} = \sigma_s + a \upsilon_x \varepsilon^n, \quad (7)$$

где σ_s – предел текучести материала в исходном состоянии; ε – относительная деформация; a, n – эмпирические коэффициенты для определения сопротивления деформации металла, упрочняемого в результате наклепа.

С учетом (6) и (7) уравнение (5) приводится к виду:

$$\sigma_\phi = n_t n_v \upsilon_x^m (\sigma_s + \upsilon_x a \varepsilon^n). \quad (8)$$

Применение выражения (8) в дифференциальном уравнении (3) приводит к сложности его решения.

Согласно исследованиям В. С. Смирнова [8], использование некоторого постоянного усредненного значения сопротивления деформации упрочняемого металла, равного полусумме величин сопротивления до и после обработки, существенно не изменяет точности решения дифференциального уравнения.

Если в состоянии утряски сопротивление металла порошка пластической деформации равно σ_x , то после деформации эта величина, с учетом уравнения (7), будет:

$$\sigma_{тп} = \sigma_s + a \upsilon_n \varepsilon^n. \quad (9)$$

Усредненное значение сопротивления металлической составляющей порошка пластической деформации будет равно:

$$\sigma_{тс} = \sigma_s + \frac{\upsilon_{п} a \varepsilon^n}{2}. \quad (10)$$

Учитывая выражения (9) и (10), зависимость (8) примет вид:

$$\sigma_{\phi} = n_{т} n_{v} \upsilon_x^m \sigma_{тс}. \quad (11)$$

Исходя из постоянства массы в очаге уплотнения и деформации порошкового материала, получаем:

$$\upsilon_x = \frac{D_k^2 - d^2}{D_x^2 - d^2} \upsilon_k.$$

С учетом этого имеем:

$$\sigma_{\phi} = n_{т} n_{v} \frac{(D_k^2 - d^2)^m \upsilon_k^m}{(D_x^2 - d^2)^m} \sigma_{тс}. \quad (12)$$

Условие пластического течения с учетом зависимости (12) в этом случае примет вид:

$$\sigma_x = -n_{т} n_{v} n_{\beta} \frac{(D_k^2 - d^2)^m \upsilon_k^m}{(D_x^2 - d^2)^m} \sigma_{тс} + p_x. \quad (13)$$

Продифференцировав выражение (13), получим:

$$d\sigma_x = n_{т} n_{v} n_{\beta} \frac{(D_k^2 - d^2)^m \upsilon_k^m m 2D_x dD_x}{(D_x^2 - d^2)^{m+1}} \sigma_{тс} + dp_x. \quad (14)$$

С учетом уравнений (12)–(14) дифференциальное уравнение (3) запишем в следующем виде:

$$\frac{dp_x}{dD_x} - p_x \frac{2D_x}{D_x^2 - d^2} A_1 = -B_1 \frac{2D_x}{(D_x^2 - d^2)^{m+1}}, \quad (15)$$

где

$$A_1 = 1 + \frac{f_1 + \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha (1 - f_1 \operatorname{tg} \alpha)}; \quad B_1 = K \left(m + 1 + \frac{d}{2 \operatorname{tg} \alpha D_{cp}} \right); \quad K = n_{т} n_{v} n_{\beta} \upsilon_k^m (D_k^2 - d^2) \sigma_{тс}.$$

Уравнение (15) является линейным неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка. Оно относится к виду

$$\frac{dy}{dx} + \Phi_x y = Q_x$$

и имеет интегрирующий множитель

$$z = e^{\int \Phi_x dx}.$$

Общий интеграл данного уравнения представляет собой следующее выражение:

$$y = e^{\pm \int \Phi_x dx} (C_1 + \int Q_x e^{\mp \int \Phi_x dx} dx). \quad (16)$$

Для рассматриваемого дифференциального уравнения имеем:

$$y = p_x; \quad dx = dD_x; \quad \Phi_x = -A_1 \frac{2D_x}{(D_x^2 - d^2)^{m+1}}; \quad Q_x = -B_1 \frac{2D_x}{(D_x^2 - d^2)^{m+1}}.$$

В этом случае выражение (16) будет иметь вид:

$$p_x = e^{A_1 \int \frac{2D_x dD_x}{D_x^2 - d^2}} \left[C_1 - B_1 \int \frac{2D_x dD_x}{(D_x^2 - d^2)^{m+1}} e^{-A_1 \int \frac{2D_x dD_x}{D_x^2 - d^2}} \right]. \quad (17)$$

Решая первый интеграл, получаем:

$$\int \frac{2D_x}{D_x^2 - d^2} dD_x = \ln(D_x^2 - d^2). \quad (18)$$

Тогда можно записать:

$$e^{A_1 \ln(D_x^2 - d^2)} = (D_x^2 - d^2)^{A_1}. \quad (19)$$

Решая второй интеграл, получаем:

$$\int \frac{2D_x (D_x^2 - d^2)^{-A_1}}{(D_x^2 - d^2)^{m+1}} = -\frac{1}{(m + A_1)(D_x^2 - d^2)^{m+A_1}}. \quad (20)$$

С учетом полученных соотношений (18)–(20), зависимость (17) примет вид:

$$p_x = (D_x^2 - d^2)^{A_1} \left[C_1 + \frac{B_1}{(m + A_1)(D_x^2 - d^2)^{m+A_1}} \right]. \quad (21)$$

Определяя постоянную интегрирования C_1 из начальных условий, зависимость (21) примет вид:

$$p_x = \frac{\left(K - \frac{B_1}{m + A_1} \right) (D_x^2 - d^2)^{A_1}}{(D_0^2 - d^2)^{m+A_1}} + \frac{B_1}{(m + A_1)(D_x^2 - d^2)^m}. \quad (22)$$

Для определения напряжения растяжения, действующего на первом участке в сечении сердечника, выделим элементарный объем толщиной dx (рис. 3).

Уравнение равновесия всех сил, действующих на выделенный элемент, в виде проекций их на направление волочения, имеет вид:

$$-\sigma_{cx} A_c + (\sigma_{cx} + d\sigma_{cx}) A_c - \tau_2 \pi d dx = 0, \quad (23)$$

где A_c – площадь поперечного сечения сердечника.

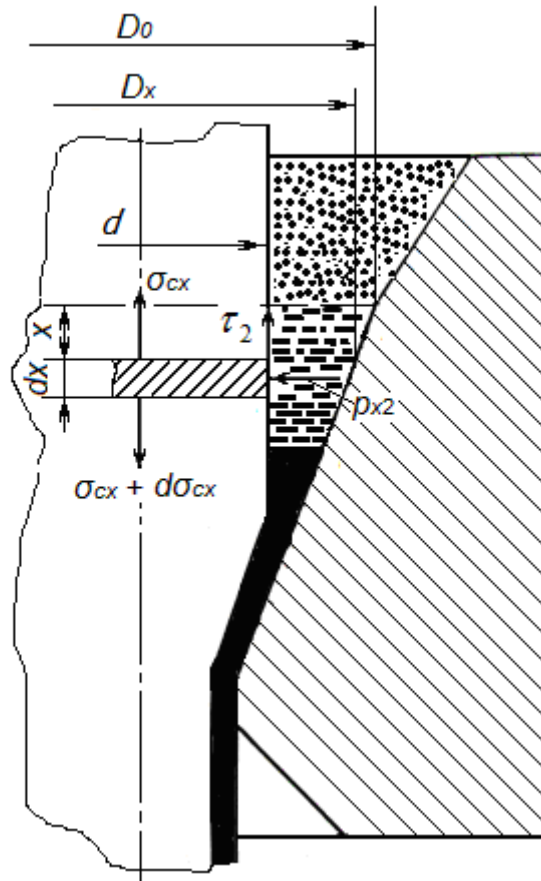


Рис. 3. Схема к составлению дифференциального уравнения равновесия элементарного объема сердечника

Исходя из закона Зибеля, напряжение τ_2 с учетом зависимости (12) может быть определено по зависимости:

$$\tau_2 = \frac{K'}{2(D_x^2 - d^2)^m}, \quad (24)$$

где $K' = n_r n_v (D_k^2 - d^2) v_k^m \sigma_{тс}$.

Выразим переменную x через текущий диаметр рабочего конуса волокна:

$$x = \frac{D_0 - D_x}{2 \operatorname{tg} \alpha},$$

откуда

$$dx = -\frac{dD_x}{2 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (25)$$

С учетом выражений (24) и (25) уравнение равновесия (23) примет следующий вид:

$$d\sigma_{cx} = -\frac{K' dD_x}{(D_x^2 - d^2)^m dtg \alpha}. \quad (26)$$

В случае целого значения m можно взять точно интеграл от выражения в правой части уравнения (26), в противном случае интеграл берется приближенно. Поэтому, принимая

$$\frac{d}{D_x} \approx \frac{d}{D_{cp}},$$

выражение (26) можно записать в следующем виде:

$$d\sigma_{cx} = -\frac{K'D_x dD_x}{(D_x^2 - d^2)^m dD_{cp} \operatorname{tg}\alpha}. \quad (27)$$

Проинтегрировав выражение (27), получим:

$$\sigma_{cx} = \frac{K'}{2(m-1)(D_x^2 - d^2)^{m-1} dD_{cp} \operatorname{tg}\alpha} + C_2. \quad (28)$$

Определяя постоянную интегрирования C_2 из начальных условий, зависимость (28) примет вид:

$$\sigma_{cx} = \frac{K'}{2(v-1)dD_{cp} \operatorname{tg}\alpha} \left[\frac{1}{(D_x^2 - d^2)^{m-1}} - \frac{1}{(D_0^2 - d^2)^{m-1}} \right]. \quad (29)$$

Заключение

На основании теоретических исследований были получены аналитические зависимости для определения нормального напряжения p_x в слое покрытия и растягивающего напряжения σ_{cx} в сердечнике на первом участке формирования покрытия в процессе волочения, которые позволяют определить их значения в начале второго участка.

Полученные значения являются основными для дальнейших исследований напряженного состояния в очаге деформации на втором и третьем участках формирования покрытия.

Литература

1. Бобарикин, Ю. Л. Технологическое условие образования соединения между металлической основой и порошковым покрытием на стадии их совместной пластической деформации в технологиях плакирования / Ю. Л. Бобарикин, Н. В. Иноземцева // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2006. – № 3. – С. 15–21.
2. Бобарикин, Ю. Л. Напряженное состояние очага деформации при плакировании прошивкой / Ю. Л. Бобарикин, В. Ф. Буренков // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2009. – № 2. – С. 36–44.
3. Бобарикин, Ю. Л. Теоретическое определение контактных напряжений при плакировании полос порошковыми материалами / Ю. Л. Бобарикин, Н. И. Стрикель, А. М. Урбанович // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2000. – № 2. – С. 15–24.
4. Снигирев, Д. П. Напряженное состояние при осесимметричном волочении медного прутка / Д. П. Снигирев // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2008. – Т. 313, № 2. – С. 21–27.

5. Рудской, А. И. Волочение : учеб. пособие / А. И. Рудской, В. А. Лунев, О. П. Шаболдо. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 126 с.
6. Перлин, И. Л. Теория волочения / И. Л. Перлин, М. З. Ерманок. – М. : Metallurgia, 1971. – 448 с.
7. Альшевский, Л. Е. Тяговое усилие при холодном волочении труб / Л. Е. Альшевский. – М. : Metallurgizdat, 1952. – 144 с.
8. Мусихин, А. М. Напряжения в очаге деформации при холодной прокатке пористых металлов / А. М. Мусихин // Порошковая металлургия. – 1977. – № 12. – С. 32–38.
9. Степаненко, А. В. Непрерывное формирование металлических порошков и гранул / А. В. Степаненко, Л. А. Исаевич. – Минск : Наука и техника, 1980. – 256 с.
10. Смирнов, В. С. Давление металла на валки при наличии упрочнения / В. С. Смирнов // Обработка металлов давлением / В. С. Смирнов. – Л. : Машгиз, 1959. – С. 45–49.

Получено 05.09.2019 г.