

УДК 621.777:621.79

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ФОРМИРУЕМОГО ПОКРЫТИЯ В ПРОЦЕССЕ ВОЛОЧЕНИЯ

Н. В. ИНОЗЕМЦЕВА, А. Т. БЕЛЬСКИЙ

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

Представлены теоретические исследования с целью получения зависимости для определения нормального напряжения в слое покрытия и растягивающего напряжения в сердечнике на втором участке формирования покрытия в процессе волочения.

Ключевые слова: деформирование, волочение, деформации, напряжения, покрытие, основа, плакирование.

THEORETICAL STUDY STRESS STATE OF FORMED COATING IN DRAWING PROCESS

N. V. INOZEMTSEVA, A. T. BELSKY

*Educational Institution "Sukhoi State Technical
University of Gomel", the Republic of Belarus*

The article presents the theoretical studies in order to obtain a dependency for determining the normal stress in the coating layer and the tensile stress in the core in the second section of the coating formation during the drawing process.

Keywords: deformation, drawing, deformation, stresses, coating, base, cladding.

Введение

Способы нанесения металлических порошковых покрытий на металлическую основу в технологиях плакирования методом совместной пластической деформации основы и порошка покрытия отличаются высокой производительностью 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 металлической 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 качественного покрытия. Поэтому их анализ является актуальным. При применении процесса волочения для формирования покрытия металлический порошок из сыпучей среды в рабочем конусе волоки постепенно превращается в жесткое тело, обладающее упругостью и механической прочностью. На основании этого рабочий конус волоки можно разбить на три участка (рис. 1).

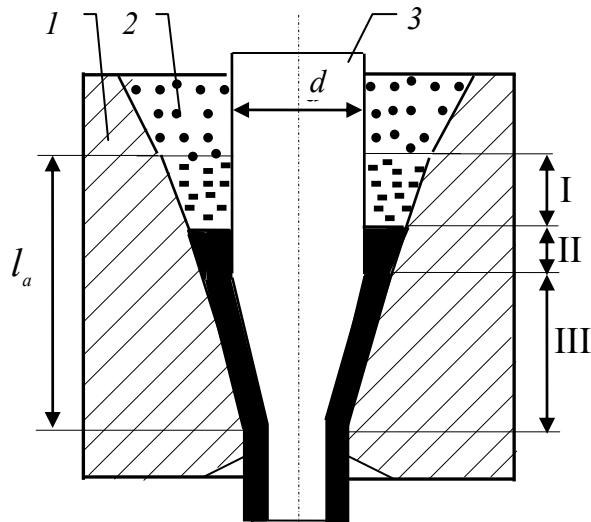


Рис. 1. Схема формирования покрытия из порошка металла при волочении:
1 – волока; 2 – порошок; 3 – проволока

В работе [2] было рассмотрено напряженно-деформированное состояние на первом участке, где происходит увеличение плотности порошка металла – от состояния утряски до состояния компактного металла. Были получены зависимости для расчета нормального контактного давления p_x в покрытии и продольного напряжения σ_{cx} – в сердечнике.

Данная работа посвящена рассмотрению второго участка рабочего конуса волоки, где происходит дальнейшая деформация формируемого покрытия до момента, когда напряжение в сердечнике достигнет предела текучести. Возникающие в центральных слоях растягивающие напряжения могут при некоторых условиях (большой угол конусности, высокие обжатия и коэффициенты трения) вызвать нарушение целостности протягиваемого металла в центральных слоях, распространяющееся затем на периферию. Поэтому анализ напряженного состояния на втором участке является актуальным.

На третьем участке происходит совместная деформация, как покрытия, так и сердечника.

Расчет нормального контактного напряжений в покрытии

Уравнение равновесия всех сил, действующих на кольцевой элемент покрытия толщиной dx на втором участке (рис. 2), имеет вид

$$\sigma'_x A_x - (\sigma'_x + d\sigma'_x)(A_x - dA_x) + \tau'_2 d_x \pi d - \tau'_1 \pi \left(D_x - \frac{dD_x}{2} \right) d_x - p'_{x1} \pi \left(D_x - \frac{dD_x}{2} \right) dx \operatorname{tg} \alpha = 0, \quad (1)$$

где D_x – диаметр рабочего конуса волоки в сечении x ; α – рабочий угол волоки; A_x – площадь покрытия в сечении x .

После преобразования можно получить уравнение равновесия (1) в следующем виде

$$\sigma'_x dA_x - d\sigma'_x A_x + \tau'_2 dx \pi d - \tau'_1 \pi D_x dx - p'_{x1} \pi D_x dx \operatorname{tg} \alpha = 0. \quad (2)$$

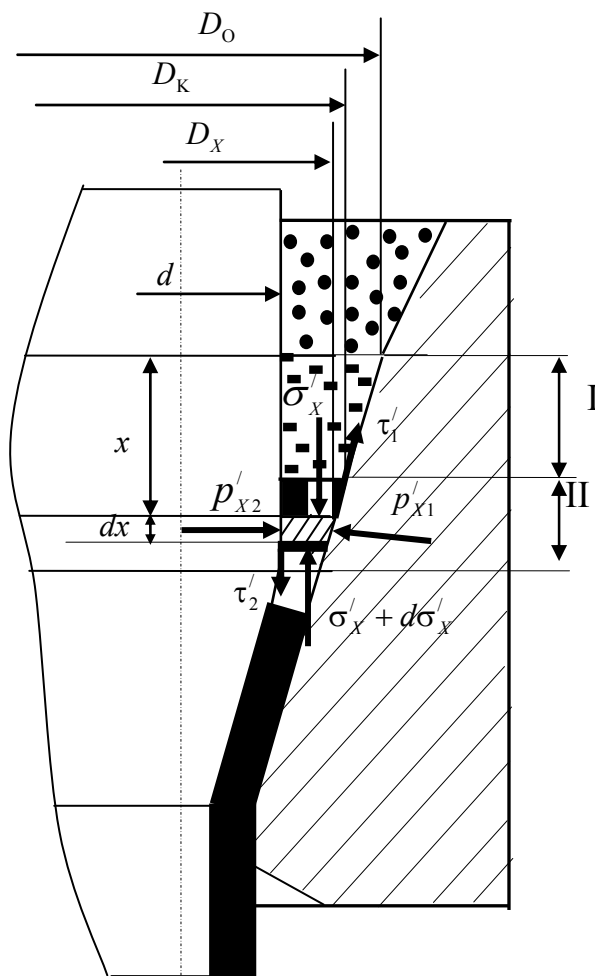


Рис. 2. Схема к составлению дифференциального уравнения равновесия элементарного объема покрытия кольцевой формы при волочении на втором участке

Фактическое сопротивление пластической деформации порошка на этом участке формирования покрытия при волочении представим в следующем виде [2], [5]:

$$\sigma'_\phi = n_t n_v \left(\sigma_{\text{тк}} + m_1 \frac{A_k}{A_x} - m_1 \right), \quad (3)$$

где d – диаметр сердечника; n_t – коэффициент, учитывающий влияние температуры; n_v – коэффициент, учитывающий влияние скорости волочения; $\sigma_{\text{тк}}$ – предел текучести материала покрытия в начале второго участка; m_1 – модуль упрочнения на втором участке; A_k – площадь покрытия в конце первого участка.

Принимая $\tau'_1 = f_1 p'_{x1}$ и $\tau'_2 = 0,5\sigma'_\phi$, уравнение (2) запишем следующим образом:

$$\frac{d\sigma'_x}{dD_x} - \sigma'_x \frac{2D_x}{D_x^2 - d^2} + \frac{M_1}{D_x^2 - d^2} + \frac{M_2}{(D_x^2 - d^2)^2} - p'_{x1} \frac{2D_x(f_1 + \text{tg}\alpha)}{(D_x^2 - d^2)\text{tg}\alpha} = 0, \quad (4)$$

где M_1, M_2 – коэффициенты, определяемые по выражениям:

$$M_1 = \frac{n_t n_v (\sigma_{\text{тк}} - m_1) d}{\text{tg}\alpha}; \quad M_2 = \frac{n_t n_v m_1 A_k 4d}{\pi \text{tg}\alpha}.$$

Связь между нормальным контактным давлением и средним продольным напряжением установим исходя из упрощенного условия пластичности течения осесимметричных тел [3]:

$$p'_x = n_\beta \sigma'_\phi + \sigma'_x, \quad (5)$$

где n_β – коэффициент Лоде.

Принимая во внимание уравнение (3), условие пластичности можно записать в следующем виде:

$$p'_x = n_t n_v n_\beta (\sigma_{\text{тк}} + m_1 \frac{A_k}{\frac{\pi}{4}(D_x^2 - d^2)} - m_1) + \sigma'_x, \quad (6)$$

откуда $dp'_x = -n_t n_v n_\beta 4m_1 \frac{A_k 2D_x dD_x}{\pi(D_x^2 - d^2)^2} + d\sigma'_x.$ (7)

Подставляя значение $d\sigma'_x$ и σ'_x из выражений (7) и (6) в уравнение (4), а также учитывая, что $p'_{x1} = \frac{p'_x}{1 - f_1 \text{tg}\alpha}$, получим:

$$\frac{dp'_x}{dD_x} - A_2 p'_x \frac{2D_x}{D_x^2 - d^2} = -B_2 \frac{2D_x}{(D_x^2 - d^2)^2} - B_3 \frac{2D_x}{D_x^2 - d^2}. \quad (8)$$

Постоянные коэффициенты, входящие в данное дифференциальное уравнение, определяют по выражениям:

$$A_2 = 1 + \frac{f_1 + \text{tg}\alpha}{\text{tg}\alpha(1 - f_1 \text{tg}\alpha)};$$

$$B_2 = 8n_t n_v n_\beta m_1 \frac{A_k}{\pi} + \frac{M_2}{2D_{\text{cp}}};$$

$$B_3 = n_t n_v n_\beta (\sigma_{\text{тк}} - m_1) + \frac{M_1}{2D_{\text{cp}}}.$$

Дифференциальное уравнение (8) представляет собой линейное неоднородное уравнение первого порядка и относится к виду

$$\frac{dy}{dx} + \Phi_x y = Q_x \quad (9)$$

и имеет интегрирующий множитель

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

Общий интеграл дифференциального уравнения (9) представляет собой следующее выражение [4]:

$$y = e^{\pm \int \Phi_x dx} \left(C + \int Q_x e^{\mp \int \Phi_x dx} dx \right). \quad (10)$$

Для рассматриваемого дифференциального уравнения (8) имеем:

$$y = p'_x; \quad dx = dD_x; \quad \Phi_x = -A_2 \frac{2D_x}{D_x^2 - d^2}; \quad Q_x = -B_2 \frac{2D_x}{(D_x^2 - d^2)^2} - B_3 \frac{2D_x}{D_x^2 - d^2}. \quad (11)$$

Осуществляя подстановку соотношений (11) в выражение (10), получим:

$$p'_x = e^{A_2 \int \frac{2D_x}{D_x^2 - d^2} dD_x} \left[C_3 - B_2 \int \frac{2D_x dD_x}{(D_x^2 - d^2)^2} e^{-A_2 \int \frac{2D_x dD_x}{D_x^2 - d^2}} - B_3 \int \frac{2D_x dD_x}{D_x^2 - d^2} e^{-A_2 \int \frac{2D_x dD_x}{D_x^2 - d^2}} \right]. \quad (12)$$

Учитывая, что

$$e^{A_2 \int \frac{2D_x dD_x}{D_x^2 - d^2}} = (D_x^2 - d^2)^{A_2},$$

уравнение (12) принимает вид

$$p'_x = (D_x^2 - d^2)^{A_2} \left[C_3 - B_2 \int \frac{2D_x dD_x}{(D_x^2 - d^2)^{A_2+2}} - B_3 \int \frac{2D_x dD_x}{(D_x^2 - d^2)^{A_2+1}} \right]. \quad (13)$$

Решая интегралы, получаем:

$$\int \frac{2D_x dD_x}{(D_x^2 - d^2)^{A_2+2}} = -\frac{1}{(A_2 + 1)(D_x^2 - d^2)^{A_2+1}}; \quad (14)$$

$$\int \frac{2D_x dD_x}{(D_x^2 - d^2)^{A_2+1}} = -\frac{1}{A_2(D_x^2 - d^2)^{A_2}}. \quad (15)$$

С учетом соотношений (14) и (15) зависимость (13) преобразуем к следующему виду:

$$p'_x = C_3 (D_x^2 - d^2)^{A_2} + \frac{B_2}{(A_2 + 1)(D_x^2 - d^2)} + \frac{B_3}{A_2}. \quad (16)$$

Постоянную величину интегрирования C_3 найдем из граничных условий. Так как при $D_x = D_k$ $p'_x = p_1$,

$$C_3 = \frac{p_1 - \frac{B_2}{(A_2 + 1)(D_k^2 - d^2)} - \frac{B_3}{A_2}}{(D_k^2 - d^2)^{A_2}}, \quad (17)$$

где p_1 – нормальное контактное давление в конце первого участка; D_k – диаметр рабочего конуса в конце первого участка.

С учетом постоянной величины интегрирования (17) зависимость распределения нормального контактного давления вдоль очага деформации на втором участке формирования покрытия имеет вид

$$p'_x = \left[p_1 - \frac{B_3}{A_2} - \frac{B_2}{(A_2 + 1)(D_k^2 - d^2)} \right] \frac{(D_x^2 - d^2)^{A_2}}{(D_k^2 - d^2)^{A_2}} + \frac{B_2}{(A_2 + 1)(D_x^2 - d^2)} + \frac{B_3}{A_2}. \quad (18)$$

Расчет продольного напряжения в сердечнике

На рис. 3 показан элементарный объем сердечника толщиной dx , выделенный на втором участке формирования покрытия из порошка металла.

Условие равновесия всех сил, действующих на этот объем, в проекциях на направление волочения имеет следующий вид:

$$-\sigma'_{cx} A_c + (\sigma'_{cx} + d\sigma'_{cx}) A_c - \tau'_2 \pi d dx = 0. \quad (19)$$

С учетом того, что

$$\tau'_2 = 0,5\sigma'_\phi; \quad \sigma'_\phi = n_t n_v \sigma_{tx}; \quad \sigma_{tx} = \sigma_{тк} + m_1 \frac{A_k}{A_x} - m_1; \quad m_1 = \frac{\sigma_{т2} - \sigma_{тк}}{\frac{F_k}{F_\Pi} - 1},$$

имеем:

$$d\sigma'_{cx} A_c - 0,5 n_t n_v (\sigma_{тк} + m_1 \frac{A_k}{A_x} - m_1) \pi d dx = 0. \quad (20)$$

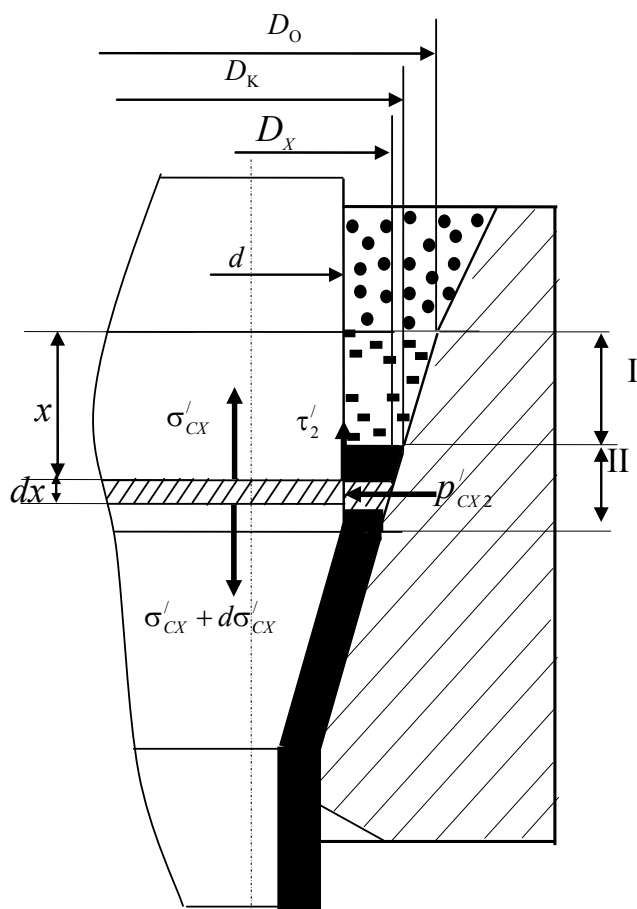


Рис. 3. Схема к составлению дифференциального уравнения равновесия элементарного объема сердечника на втором участке волочения

Интегрируя дифференциальное уравнение (20), получаем:

$$\sigma'_{cx} = C_4 - A_3 D_x - B_4 \frac{1}{2d} \ln \left| \frac{D_x - d}{D_x + d} \right|, \quad (21)$$

где A_n – площадь поперечного сечения покрытия в конце второго участка; $\sigma_{т2}$ – предел текучести материала покрытия в конце второго участка; $A_3 = \frac{n_t n_v (\sigma_{тк} - m_1)}{dtg\alpha}$;

$$B_4 = \frac{4n_t n_v m_1 A_k}{\pi dtg\alpha}.$$

Постоянную величину интегрирования C_4 найдем из граничных условий. Учитывая, что при $D_x = D_k$ $\sigma'_{cx} = \sigma_{ck}$, получаем:

$$C_4 = \sigma_{ck} + A_3 D_k + B_4 \frac{1}{2d} \ln \left| \frac{D_k - d}{D_k + d} \right|. \quad (22)$$

С учетом постоянной величины интегрирования (22) уравнение (21) принимает вид

$$\sigma'_{cx} = \sigma_{ck} + A_3 (D_k - D_x) + B_4 \frac{1}{2d} \ln \left| \frac{(D_k - d)(D_x + d)}{(D_k + d)(D_x - d)} \right|. \quad (23)$$

Заключение

На основании теоретических исследований были получены зависимости для определения нормального напряжения p'_x в слое покрытия и растягивающего напряжения σ'_{cx} в сердечнике на втором участке формирования покрытия в процессе волочения.

Значения p'_x и σ'_{cx} в конце второго участка будут являться начальными параметрами напряженно-деформируемого состояния третьего участка рабочего конуса волокна.

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. Бельский, А. Т. Теоретическое исследование напряженного состояния в очаге деформации при формировании покрытия в процессе волочения / А. Т. Бельский, Н. В. Иноземцева // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 1 (80). – С. 23–31.
3. Перлин, И. Л. Теория волочения / И. Л. Перлин, М. З. Ерманок. – М. : Metallurgia, 1971. – 448 с.
4. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – М. : АСТ: Астрель, 2006. – 991 с.
5. Степаненко, А. В. Непрерывное формование металлических порошков и гранул / А. В. Степаненко, Л. А. Исаевич. – Минск : Наука и техника, 1980. – 256 с.

Дата получения 30.06.2021 г.