

УДК 621.762

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЛАКИРОВАНИИ ПОЛОС ПОРОШКОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Ю.Л. БОБАРИКИН, Н.И. СТРИКЕЛЬ, А.М. УРБАНОВИЧ

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

Процесс плакирования порошковыми покрытиями металлической основы заключается в совместной пластической деформации основы и металлического порошка деформирующим инструментом. Совместная пластическая деформация позволяет сформировать порошковое покрытие и закрепить его на металлической основе. Покрытия могут иметь различные функциональные назначения, определяемые свойствами порошка. Наличие металлической основы способствует повышению конструкционной прочности получаемого слоистого материала и экономии дорогостоящих материалов.

Создание нормальных контактных напряжений обеспечивает получение качественного соединения между плакирующим и плакируемым слоями, а также получение качественного порошкового слоя. Поэтому их анализ является актуальным.

Для теоретического определения контактных напряжений очаг уплотнения деформации порошка для этой схемы можно условно разделить на два участка (рис.1). На первом участке aa'bb' происходит уплотнение и деформация порошка без пластической деформации подложки. На втором участке bb'cc' порошковый слой деформируется на пластически деформируемой подложке. Границей между первым и вторым участками будет являться сечение, в котором начинается совместная пластическая деформация подложки и порошкового слоя.

Контактные нормальные напряжения на первом участке можно определить по аналогии с определением напряжений при прокатке порошка и полосы без объемной деформации последней. При этом, на данном участке (рис.2) уплотнение порошка будет происходить только с отставанием. Поэтому по аналогии с [1] для первого участка значение контактных нормальных напряжений можно определить по зависимости:

$$p_x \approx \beta \cdot \left( \frac{h_g \cdot \rho_g}{h} \right)^m \cdot \left[ \left( \sigma_s + \sigma_{TC} \cdot \frac{m-1}{\delta-m} \right) \cdot \left( \frac{h}{h_x} \right)^\delta - \sigma_{TC} \cdot \frac{m-1}{\delta-m} \cdot \left( \frac{h}{h_x} \right)^m \right], \quad (1)$$

где  $h_g, \rho_g$  - высота и плотность сечения порошка в момент начала пластической деформации подложки;

$\beta$  - коэффициент Лодэ, для прокатки  $\beta=1,15$  [2];

$\sigma_{TC}$  - усреднённое сопротивление деформации порошка;

$\sigma_s$  - предел текучести материала порошка;

$m$  - показатель, который для порошкового материала находится в пределах 3...5 [3];

$\delta$  - величина, характеризующая совокупность влияния коэффициентов трения;

$h$  - высота уровня порошка в начале угла прокатки порошка.

Значения  $\sigma_{ТС}$ ,  $\delta$  определяются по зависимостям [1]

$$\sigma_{ТС} = \sigma_s + \frac{\rho_g \cdot a_M \cdot (h - h_g)^n}{h^n}, \quad \delta = \frac{\mu + \mu_1}{2 \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha_p - \alpha_g}{2} \right)}, \quad (2)$$

где  $\alpha_g$  - угол, определяющий сечение в очаге деформации, соответствующее началу совместной пластической деформации порошка и полосы;

$\mu$  - коэффициент внешнего трения порошка о поверхность вала;

$\alpha_p$  - угол прокатки порошка;

$\mu_1$  - коэффициент внешнего трения порошка о поверхность подложки;

$a_M, n$  - эмпирические коэффициенты, используемые для определения сопротивления деформации металла, упрочняемого в результате наклёпа.

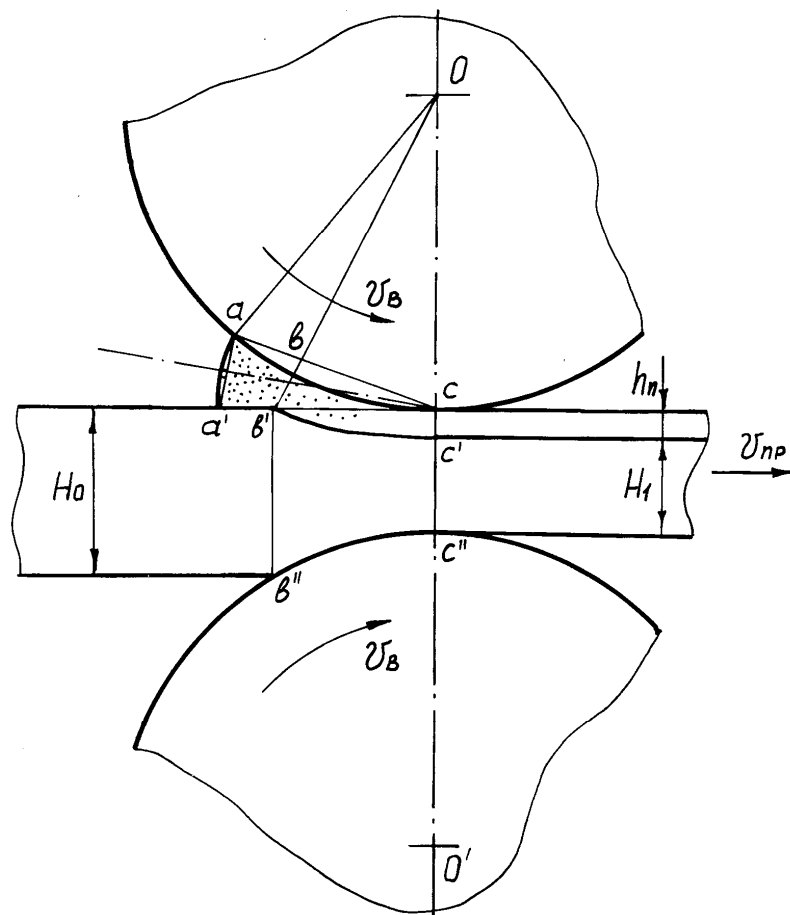


Рис. 1. Участки уплотнения и деформации порошка при его накатке на пластически деформируемую полосу:  $aa'bb'$  - первый участок;  $cc'bb'$  - второй участок.

Значение  $\alpha_g$  определяется по формуле  $\alpha_g \approx \sqrt{\frac{H_0 - H_1}{2 \cdot (R + h_n)}}$  [1] при допущении того, что порошок во второй зоне  $bb'cc'$  деформируется с малым обжатием по толщине

и предполагается, что прокатка полосы ведется с радиусом верхнего валка  $R + h_n$ , хотя, в действительности, величины  $h_g$  и  $h_n$  будут немного различаться, то есть  $h_g > h_n$ . Но для случая тонких покрытий, когда  $h_n \leq 1$  мм, это допущение не вызовет больших погрешностей.

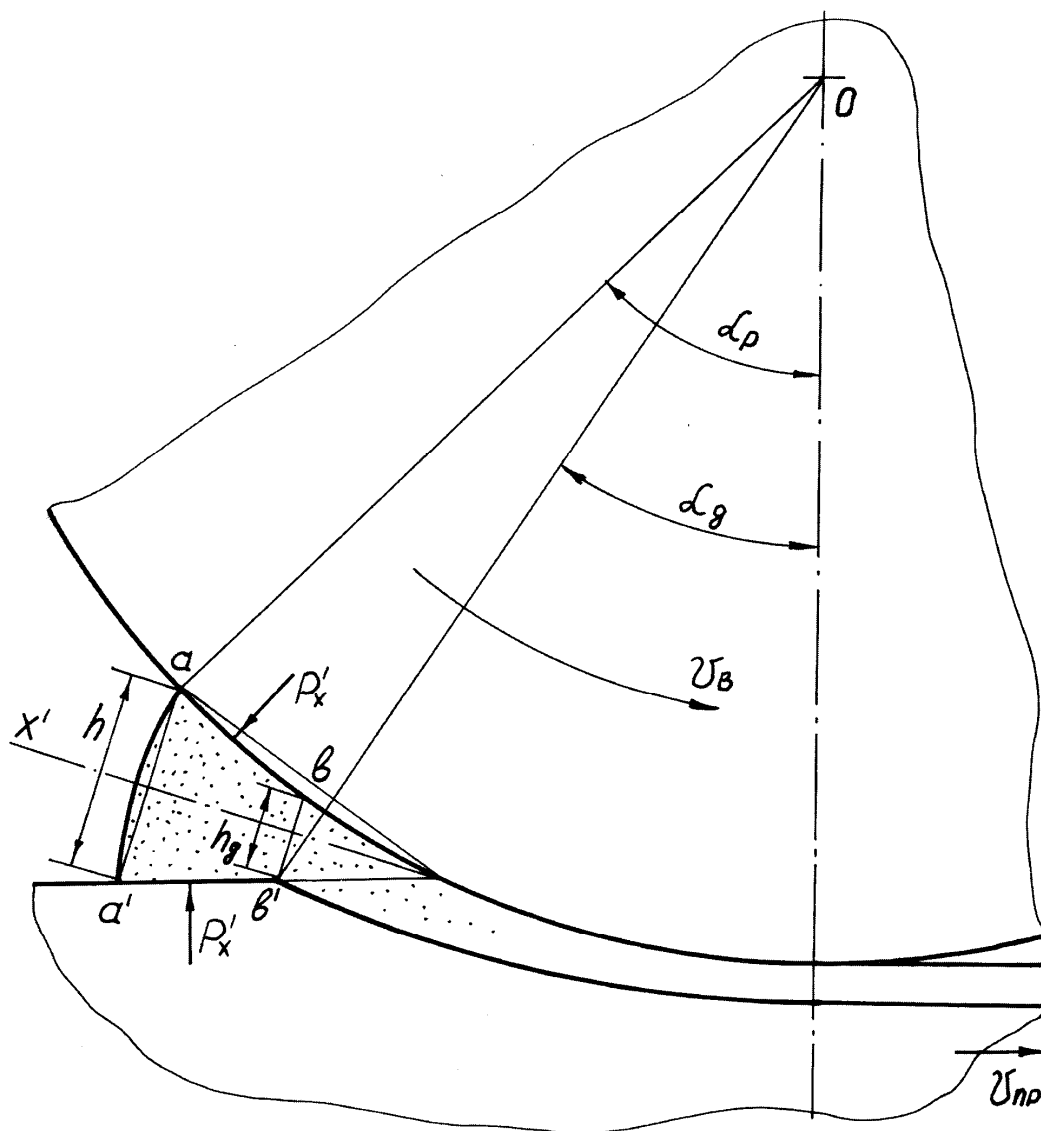


Рис. 2. Схема к расчету контактных напряжений, действующих на первом участке уплотнения и деформации порошка

В выражение (1) входят неизвестные величины  $h_g$  и  $\rho_g$ .

Для их определения согласно [1] можно воспользоваться соотношением:

$$h \cdot \rho_p = h_g \cdot \rho_g, \tag{3}$$

где  $\rho_p$  - плотность порошка в сечении очага деформации, положение которого определяется углом  $\alpha_p$ , равная плотности утряски порошка.

Однако, вследствие того, что величина  $\rho_g$  неизвестна, из (3) нельзя определить  $h_g$ . Для того, чтобы определить  $h_g$ , определим, какой величине должна быть равна  $p_x^{\sim}$  при  $h_x = h_g$  исходя из условия начала пластической деформации подложки.

В момент начала пластической деформации полосы  $\sigma_x = 0$ , тогда для подложки или полосы условие начала пластического течения будет иметь вид [2]:

$$p_x^{\sim} = \beta \cdot \sigma_{sk}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{sk}$  - предел текучести материала полосы.

Значение  $p_x^{\sim}$  в (4) будет приблизительно равно значению  $p_x^{\sim}$  по (1) при  $h_x = h_g$ , тогда выражение (1) для этого случая примет вид:

$$\sigma_{sk} = \rho_p^m \cdot \left[ \left( \sigma_s + \sigma_{TC} \cdot \frac{m-1}{\delta-m} \right) \cdot \left( \frac{h}{h_g} \right)^\delta - \sigma_{TC} \cdot \frac{m-1}{\delta-m} \cdot \left( \frac{h}{h_g} \right)^m \right]. \quad (5)$$

Несколько упростим выражение (5) и примем, что в этом выражении  $\sigma_s = \sigma_{TC}$ . Тогда (5) примет вид:

$$\sigma_{sk} = \frac{\rho_p^m \cdot \sigma_{TC}}{m-\delta} \cdot \left[ \left( \frac{h}{h_g} \right)^\delta \cdot (1-\delta) + \left( \frac{h}{h_g} \right)^m \cdot (m-1) \right]. \quad (6)$$

Выражение для определения  $\sigma_{TC}$  (2) при  $h_x = h_g$  примет вид:

$$\sigma_{TC} = \sigma_s + \frac{\rho_\delta \cdot a_M \cdot (h-h_g)^n}{2 \cdot h^n}. \quad (7)$$

Упростим это выражение, разложив в ряд множитель в степени  $n$ :

$$\frac{(h-h_g)^n}{h^n} \approx 1 - \frac{n \cdot h_g}{h}.$$

Тогда (7) с учетом (3) примет вид:

$$\sigma_{TC} = \sigma_s + \frac{h \cdot \rho_g \cdot a_M}{2 \cdot h_g} - \frac{n \cdot \rho_p \cdot a_M}{2}. \quad (8)$$

Подставив (8) в (6), обозначив  $\frac{h}{h_g} = \psi$ , получим

$$\begin{aligned} \sigma_{sk} &= \frac{\rho_p^m}{(m-\delta)} \cdot \left( \sigma_s + \frac{\rho_p \cdot a_M}{2} \cdot \psi - \frac{\rho_p \cdot a_M}{2} \cdot n \right) \times \\ &\times \left[ \psi^\delta \cdot (1-\delta) + \psi^m \cdot (m-1) \right]. \\ \text{Отсюда } \psi &= \frac{2 \cdot \sigma_{sk} \cdot (m-\delta)}{\rho_p^{m+1} \cdot a_M \cdot [\psi^\delta \cdot (1-\delta) + \psi^m \cdot (m-1)]} - \frac{2 \cdot \sigma_s}{\rho_p \cdot a_M} + n. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнение (8) является в отношении неизвестной  $\psi$  трансцендентным и в общем виде запишется так:

$$\psi = \frac{A}{\psi^\delta \cdot a - \psi^m \cdot b} + B, \tag{10}$$

где  $A = \frac{2 \cdot \sigma_{sk} \cdot (m - \delta)}{\rho_p^{m+1} \cdot a_M}$ ;

$$B = -\frac{2 \cdot \sigma_s}{\rho_p \cdot a_M} + n;$$

$$a = 1 - \delta;$$

$$b = m - 1.$$

Решение (10) аналитическими способами затруднено, поэтому его можно разрешить численными методами при известных значениях  $A, B, a, b$ .

Для определения контактных напряжений, действующих на участке  $vv'cc'$  (рис. 3), выделим бесконечно малый объем  $kk'dd'$  накатываемого порошка, ограниченный поверхностями валков и полосы, а также двумя плоскостями, проходящими по оси валка вдоль отрезков  $Ok'$  и  $Od'$ , угол между которыми равен бесконечно малому углу  $d\varphi$ . Примем в очаге уплотнения и деформации наличие зоны отставания  $bt$  и зоны опережения  $tc$ , направление сил трения  $\tau_\varphi$  в которых противоположно.

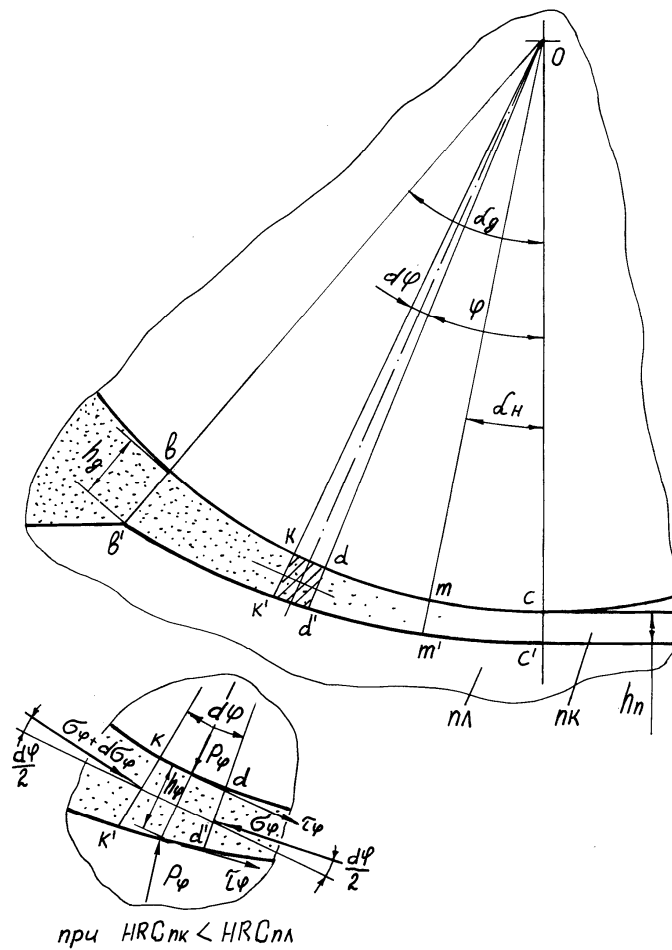


Рис. 3. Схема к расчету контактных напряжений, действующих на втором участке уплотнения и деформации порошка

Направление напряжений  $\sigma_\varphi$  и  $\sigma_\varphi + d\sigma_\varphi$ , действующих на элементарный объем порошка  $kk'dd'$ , будет зависеть от соотношения твердостей полосы и формируемого порошкового слоя на этом участке. В случае, если твердость порошкового слоя меньше твердости материала полосы, то напряжения  $\sigma_\varphi$  и  $\sigma_\varphi + d\sigma_\varphi$  сжимают элементарный объем  $kk'dd'$ . Если же твердость порошкового слоя больше твердости материала полосы, то напряжения  $\sigma_\varphi$  и  $\sigma_\varphi + d\sigma_\varphi$  действуют на растяжение этого объема.

Рассмотрим случай со сжимающим действием напряжений  $\sigma_\varphi$  и  $\sigma_\varphi + d\sigma_\varphi$ . Условие равновесия бесконечно малого элемента  $kk'dd'$  с учетом действия всех напряжений на него имеет вид [1]:

$$(\sigma_\varphi + d\sigma_\varphi) \cdot h_\varphi \cdot \cos \frac{d\varphi}{2} - \sigma_\varphi \cdot h_\varphi \cdot \cos \frac{d\varphi}{2} \pm p_\varphi \cdot \mu \cdot R \cdot d\varphi \pm \pm p_\varphi \cdot \mu_1 \cdot (R + h_\varphi) \cdot d\varphi = 0,$$

где  $p_\varphi$  - нормальное контактное напряжение;

$h_\varphi$  - толщина порошкового слоя в сечении, соответствующем углу  $\varphi$ .

Так как угол  $\frac{d\varphi}{2}$  очень мал, то предположим, что  $\cos \frac{d\varphi}{2} \approx 1$ . Вследствие того, что порошковый слой представляет собой тонкий слой покрытия, то можно предположить, что  $R \cdot d\varphi \approx (R + h_\varphi) \cdot d\varphi$ .

Тогда условие равновесия представится в виде

$$d\sigma_\varphi \cdot h_\varphi \pm p_\varphi \cdot R \cdot (\mu + \mu_1) = 0. \quad (11)$$

Знак «+» для зоны отставания, знак «-» для зоны опережения.

Предположим, что для выделенного элемента  $\sigma_1 \approx p_\varphi, \sigma_2 \approx \sigma_\varphi$ , тогда условие пластического течения запишется в виде  $p_\varphi - \sigma_\varphi = \beta \cdot \sigma_{TM}$ .

Для прокатываемого порошка согласно [1] значения фактического сопротивления пластической деформации будут равны:

$$\text{для зоны отставания } \sigma_{cp} = \frac{h_n^m \cdot \rho_n^m}{h_\varphi^m} \cdot \sigma_{TC};$$

$$\text{для зоны опережения } \sigma_{cp} = \frac{h_n^m \cdot \rho_n^m}{h_\varphi^m} \cdot \sigma_{TN},$$

где  $\rho_n$  - плотность покрытия.

Значения сопротивления пластической деформации порошка  $\sigma_{TC}$  и  $\sigma_{TN}$  для данного случая имеют вид [1]:

$$\sigma_{TC} = \sigma_s + \frac{\rho_n \cdot a_M \cdot (h_g - h_n)^n}{2 \cdot h_g^n}; \quad (12)$$

$$\sigma_{TN} = \sigma_s + \frac{\rho_n \cdot a_M \cdot (h_g - h_n)^n}{h_g^n}. \quad (13)$$

Условие пластичности для элемента имеет вид в зоне отставания [1]

$$p_\varphi - \sigma_\varphi = \beta \cdot \frac{h_n^m \cdot \rho_n^m}{h_\varphi^m} \cdot \sigma_{TC};$$

в зоне опережения  $p_\varphi - \sigma_\varphi = \beta \cdot \frac{h_n^m \cdot \rho_n^m}{h_\varphi^m} \cdot \sigma_{TN}.$

Продифференцировав эти выражения по  $h_\varphi$  и упростив, получим:

для зоны отставания

$$dp_\varphi - d\sigma_\varphi = -\beta \cdot \sigma_{TC} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot m \cdot \frac{dh_\varphi}{h_\varphi^{m+1}}. \quad (14)$$

Аналогично для зоны опережения

$$dp_\varphi - d\sigma_\varphi = -\beta \cdot \sigma_{TN} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot m \cdot \frac{dh_\varphi}{h_\varphi^{m+1}}. \quad (15)$$

Из (14) и (15) выразим  $d\sigma_\varphi$  и подставив в (11), получим:

для зоны отставания

$$h_\varphi \cdot \left( \beta \cdot \sigma_{TC} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot m \cdot \frac{dh_\varphi}{h_\varphi^{m+1}} + dp_\varphi \right) + p_\varphi \cdot R \cdot (\mu + \mu_1) \cdot d\varphi = 0;$$

для зоны опережения

$$h_\varphi \cdot \left( \beta \cdot \sigma_{TN} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot m \cdot \frac{dh_\varphi}{h_\varphi^{m+1}} + dp_\varphi \right) - p_\varphi \cdot R \cdot (\mu + \mu_1) \cdot d\varphi = 0.$$

После преобразований этих выражений умножением на  $\frac{1}{h_\varphi \cdot d\varphi}$  получим:

для зоны отставания

$$\frac{dp_\varphi}{d\varphi} + \beta \cdot \sigma_{TC} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot m \cdot \frac{1}{h_\varphi^{m+1}} \cdot \frac{dh_\varphi}{d\varphi} + p_\varphi \cdot R \cdot \frac{(\mu + \mu_1)}{h_\varphi} = 0; \quad (16)$$

для зоны опережения

$$\frac{dp_\varphi}{d\varphi} + \beta \cdot \sigma_{TN} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot m \cdot \frac{1}{h_\varphi^{m+1}} \cdot \frac{dh_\varphi}{d\varphi} - p_\varphi \cdot R \cdot \frac{(\mu + \mu_1)}{h_\varphi} = 0. \quad (17)$$

Эти уравнения имеют две неизвестные переменные  $\varphi$  и  $h_\varphi$ . Можно определить их взаимосвязь, предположив, что  $h_\varphi$  изменяется по какой-то прямой зависимости от  $\varphi$ , то есть можно предположить, что  $h_\varphi = a \cdot \varphi + b$ ,

где  $a, b$  - неизвестные коэффициенты.

Определим значения  $a$  и  $b$  из граничных условий:

при  $\varphi = 0, h_\varphi = h_n$ , тогда  $b = h_n$ ; при  $\varphi = \alpha_g, h_\varphi = h_g$ , тогда  $a = \frac{(h_g - h_n)}{\alpha_g}.$

Выражение (18) примет вид:  $h_\varphi = \frac{h_g - h_n}{\alpha_g} \cdot \varphi + h_n.$  (19)

Продифференцировав это выражение по  $\varphi$ , получим:

$$\frac{dh_\varphi}{d\varphi} = \frac{h_g - h_n}{\alpha_g}; \quad d\varphi = \frac{dh_\varphi}{h_g - h_n} \cdot \alpha_g. \quad (20)$$

С учетом (19) выражения (18) и (17) примут следующий вид:  
для зоны отставания

$$\frac{dp_\varphi}{d\varphi} + \beta \cdot \sigma_{TC} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot m \cdot \frac{1}{h_\varphi^{m+1}} \cdot \frac{dh_\varphi}{d\varphi} + p_\varphi \cdot R \cdot \frac{(\mu + \mu_1)}{\frac{(h_g - h_n) \cdot \varphi}{\alpha_g} + h_n} = 0;$$

для зоны опережения

$$\frac{dp_\varphi}{d\varphi} + \beta \cdot \sigma_{TN} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot m \cdot \frac{1}{h_\varphi^{m+1}} \cdot \frac{dh_\varphi}{d\varphi} - p_\varphi \cdot R \cdot \frac{(\mu + \mu_1)}{\frac{(h_g - h_n) \cdot \varphi}{\alpha_g} + h_n} = 0.$$

Решение этих уравнений имеет вид:

$$p_\varphi = e^{\pm \int A(\varphi) d\varphi} \cdot \left[ C - \int B(h_\varphi) \cdot e^{\pm \int A(\varphi) d\varphi} \cdot dh_\varphi \right], \quad (21)$$

$$\text{где } A(\varphi) = R \cdot \frac{(\mu + \mu_1)}{\frac{(h_g - h_n) \cdot \varphi}{\alpha_g} + h_n};$$

$$B(h_\varphi) = \beta \cdot \sigma_{TC} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot m \cdot \frac{1}{h_\varphi^{m+1}} \text{ - для зоны отставания.}$$

Для упрощения решения этого уравнения перейдем от двух переменных  $\varphi$  и  $h_\varphi$  к одной  $h_\varphi$ .

Подставляя значение  $\varphi$  из (19) и значение  $d\varphi$  из (20) в выражение (21), получим

$$p_\varphi = e^{\pm \int A(h_\varphi) dh_\varphi} \cdot \left[ C - \int B(h_\varphi) \cdot e^{\pm \int A(h_\varphi) dh_\varphi} \cdot dh_\varphi \right],$$

$$\text{где } A(h_\varphi) = \frac{R \cdot \alpha_g \cdot (\mu + \mu_1)}{h_\varphi \cdot (h_g - h_n)}.$$

Значения  $B(h_\varphi)$  для этого выражения те же, что и для (21). Производя подстановку в этом выражении и учитывая выражение (2), обозначим  $\delta$  как

$$\delta = \frac{R \cdot \alpha_g \cdot (\mu + \mu_1)}{(h_g - h_n)}, \text{ получим:}$$

для зоны отставания

$$p_{\varphi_{отст}} = e^{-\delta \cdot \int \frac{dh_\varphi}{h_\varphi}} \cdot \left[ C_{отст} - \beta \cdot \sigma_{TC} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot m \cdot \int \frac{dh_\varphi}{h_\varphi^{m+1}} \cdot e^{\delta \cdot \int \frac{dh_\varphi}{h_\varphi}} \right];$$

для зоны опережения



$$p_{\varphi_{..}} = e^{\delta \cdot \int \frac{dh_{\varphi}}{h_{\varphi}}} \cdot \left[ C_1 - \beta \cdot \sigma_{TN} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot m \cdot \int \frac{dh_{\varphi}}{h_{\varphi}^{m+1}} \cdot e^{-\delta \cdot \int \frac{dh_{\varphi}}{h_{\varphi}}} \right].$$

Решение интегралов, являющихся показателем степеней числа, дает следующие выражения:  $\delta \cdot \int \frac{dh_{\varphi}}{h_{\varphi}} = \delta \cdot \ln h_{\varphi}$ ;  $e^{\delta \cdot \ln h_{\varphi}} = h_{\varphi}^{\delta}$ .

Тогда, соответственно:

$$p_{\varphi_{..}} = h_{\varphi}^{-\delta} \cdot C_o - \beta \cdot \sigma_{TC} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot m \cdot \int \frac{dh_{\varphi}}{h_{\varphi}^{m+1-\delta}};$$

$$p_{\varphi_{..}} = h_{\varphi}^{\delta} \cdot C_1 - \beta \cdot \sigma_{TN} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot m \cdot \int \frac{dh_{\varphi}}{h_{\varphi}^{m+1-\delta}}.$$

Дальнейшее решение интегралов позволяет привести эти уравнения к виду:

$$p_{\varphi_{..}} = C_o \cdot h_{\varphi}^{-\delta} + \beta \cdot \sigma_{TC} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot \frac{m}{(m-\delta) \cdot h_{\varphi}^m}; \quad (22)$$

$$p_{\varphi_{..}} = C_1 \cdot h_{\varphi}^{\delta} + \beta \cdot \sigma_{TN} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot \frac{m}{(m+\delta) \cdot h_{\varphi}^m}. \quad (23)$$

Для определения постоянных интегрирования  $C_o$  и  $C_1$ , входящих в последние выражения, воспользуемся граничными условиями.

Так, в начале данного участка уплотнения и деформации порошка давление порошка на полосу вызывает пластическую деформацию металла этой полосы. Таким образом, для начала участка при  $h_{\varphi} = h_{\delta}$  можно принять условие пластичности полосы в виде  $p_{\varphi_{om}} = \beta \cdot \sigma_{sk}$ .

При этом предполагается, что в данном сечении полосы  $\sigma_x = 0$ . Тогда выражение (22) можно записать в виде

$$\beta \cdot \sigma_{sk} = C_o \cdot h_g^{-\delta} + \beta \cdot \sigma_{TC} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot \frac{m}{(m-\delta) \cdot h_g^m}.$$

$$\text{Отсюда } C_o = \frac{\beta}{h_g^{-\delta}} \cdot \left( \sigma_{sk} - \sigma_{TC} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot \frac{m}{(m-\delta) \cdot h_g^m} \right). \quad (24)$$

Константу  $C_1$  определим из того, что в плоскости выхода прокатываемого покрытия из валков при  $h_{\varphi} = h$  можно считать, что  $\sigma_x = 0$ . Тогда нормальное контактное давление в этой точке определится так:

$$p_{\varphi_{om}} = \beta \cdot \rho_n^m \cdot \sigma_{TN}.$$

С учетом этого уравнения выражение (23) примет вид:

$$\beta \cdot \rho_n^m \cdot \sigma_{in} = C_1 \cdot h_{\delta}^{\delta} + \beta \cdot \sigma_{TN} \cdot h_n^m \cdot \rho_n^m \cdot \frac{m}{(m+\delta) \cdot h_n^m}.$$

$$\text{Откуда } C_1 = \beta \cdot \sigma_{TN} \cdot \frac{\rho_n^m}{h_n^{\delta}} \cdot \left( \frac{\delta}{m+\delta} \right). \quad (25)$$

Подставляя значения констант  $C_0$  и  $C_1$  из (24) и (25) в выражения (22) и (23) и произведя простейшие преобразования, получим окончательные уравнения, позволяющие расчетным путем определить величину нормального контактного давления на втором участке очага уплотнения и деформации металлического порошка:

$$p_{\varphi_{om}} = \beta \cdot \sigma_{sk} \cdot \left( \frac{h_g}{h_\varphi} \right)^\delta + \beta \cdot \sigma_{TN} \cdot \rho_n^m \cdot \frac{m}{m-\delta} \cdot \left[ \left( \frac{h_n}{h_\varphi} \right)^m - \left( \frac{h_n}{h_g} \right)^m \cdot \left( \frac{h_g}{h_\varphi} \right)^\delta \right]; \quad (26)$$

$$p_{\varphi_{on}} = \beta \cdot \sigma_{sk} \cdot \rho_n^m \cdot \left[ \frac{\delta}{m+\delta} \cdot \left( \frac{h_\varphi}{h_n} \right)^\delta + \frac{m}{m+\delta} \cdot \left( \frac{h_n}{h_\varphi} \right)^m \right]. \quad (27)$$

Приведенные уравнения получены для случая, когда твердость металла полосы выше твердости накатываемого порошкового слоя покрытия.

Экспериментальная проверка полученных зависимостей заключалась в теоретическом определении усилия прокатки при плакировании стальной полосы медным порошковым покрытием и сравнении величины этого усилия с экспериментальной величиной, измеренной с помощью тензометрических датчиков.

Разница в значениях составила 12%, которую можно объяснить принятыми допущениями в расчётах. Это позволяет сделать вывод о возможности использования полученных зависимостей на практике.

### Литература

1. Степаненко А.В., Исаевич Л.А. Непрерывное формование металлических порошков и гранул.– Мн.: Metallurgy, 1979. – 224 с.
2. Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением.- М.: Metallurgy, 1973.- 496 с.
3. Мусихин А. М. Напряжения в очаге деформации при холодной прокатке пористых металлов // Порошковая металлургия.- 1977.- №12.- С.32.