

УДК 621.762.4.047

Грибков Э. П.  
Данилюк В. А.**ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ОБОЛОЧКИ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ ПРОКАТКЕ ПОРОШКОВОЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ ЛЕНТЫ**

Развитие металлургии неразрывно связано с созданием новых высокоэффективных технологий и оборудования. Это в полной мере относится к прокатке порошковых электродных лент, которые представляют собой металлическую оболочку, заполненную порошковыми материалами, и имеют в сечении форму, близкую к прямоугольнику [1–3]. Широкое применение такого вида металлопродукция нашла в сварочном производстве при наплавке поверхностей [4]. В качестве оболочки используются, как правило, пластичные материалы в виде металлических лент толщиной от 0,1 до 1,0 мм.

Существуют модели напряженно-деформированного состояния при прокатке порошков, разработанные для однослойных композиций на металлической подложке [5]. Высокие требования к геометрическим характеристикам лент и физико-механическим свойствам сердечника делают актуальным исследование влияния формы металлической оболочки на геометрические и энергосиловые параметры процесса прокатки порошковых электродных лент.

Целью работы является развитие математического аппарата для определения основных параметров процесса прокатки порошкового сердечника в различных металлических оболочках.

В основу рассматриваемой численной одномерной математической модели процесса прокатки порошкового сердечника с начальной толщиной слоя  $h_0$  в металлической оболочке толщиной  $h_n$  в валках радиусами  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 1) была положена математическая модель процесса прокатки однослойных порошковых материалов [6]. Используемая в этом случае расчетная схема интегрального очага деформации представлена на рис. 2.

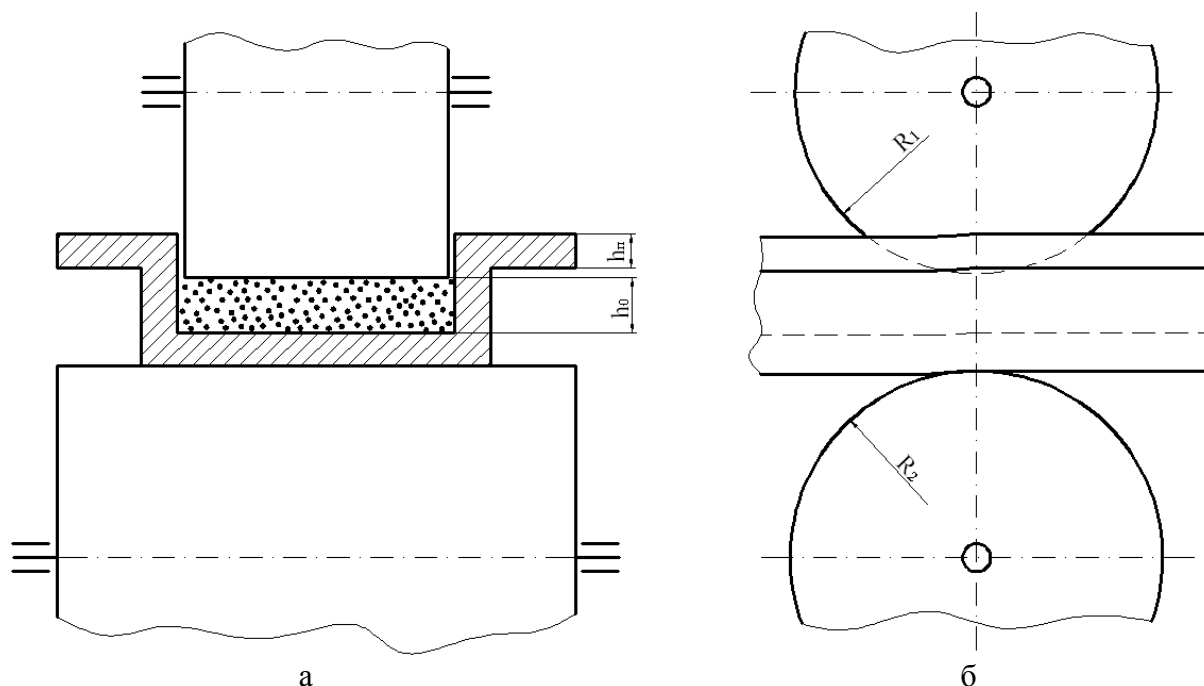


Рис. 1. Схема процесса прокатки порошкового сердечника в металлической оболочке коробчатого сечения:

а — вид спереди; б — вид сбоку

Разбиение зоны уплотнения на конечное множество элементарных объемов и определение геометрических характеристик, а также определение на основе совместного решения условия статического равновесия элементарного объема и условия пластичности для пористых материалов напряжений  $\sigma_x$ ,  $\tau_x$  и  $p_x$  в конечно-разностной форме (рис. 2) было осуществлено по аналогии с методикой, изложенной в работе [6].

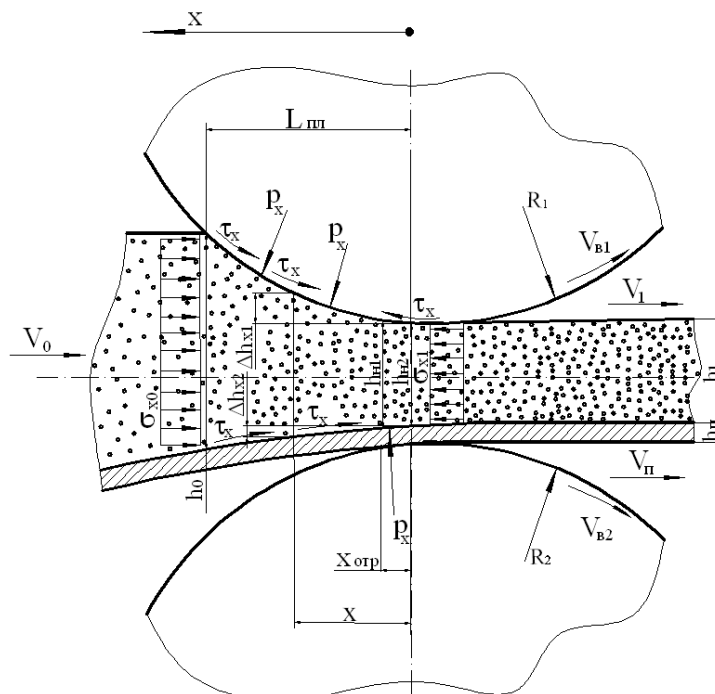


Рис. 2. Расчетная схема интегрального очага деформации

Максимальная протяженность очага деформации  $L_{nl}$  реализуется при горизонтальной задаче оболочки в валки, т. е. ленты «бесконечной жесткости», а минимальная, соответственно, – при полном прилегании ленты к поверхности рабочего валка. Численно их можно определить следующими зависимостями (рис. 2):

$$\begin{aligned} L_{nl}^{\max} &= \sqrt{2 R_1 \Delta h (R_2 + h_n) / (R_1 + R_2 + h_n)}; \\ L_{nl}^{\min} &= \sqrt{2 R_1 \Delta h}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $R_1, R_2$  – радиусы рабочих валков (рис. 2);

$\Delta h = h_0 - h_1$  – величина абсолютного обжатия порошковой составляющей.

Наличие металлической оболочки вносит асимметрию в очаг деформации, а также обуславливает появление зависимости протяженности очага уплотнения от жесткости оболочки, определяемой ее толщиной. Тем самым, усложняются и аналитические зависимости, описывающие геометрические параметры очага. Так, для описания величины текущей толщины композиции, необходимо использовать трехчленную запись:

$$h_{x1} = h_1 + \Delta h_{x1} + \Delta h_{x2}, \quad (2)$$

где  $\Delta h_{x1}$  и  $\Delta h_{x2}$  – текущие значения абсолютных обжатий со стороны ведомого и ведущего рабочих валков. Величина абсолютного обжатия со стороны ведомого валка описывается зависимостью геометрического характера:

$$\Delta h_{x1} = R_1 - \sqrt{R_1^2 - x^2}. \quad (3)$$

Для описания величины обжатия  $\Delta h_{x2}$  следует, прежде всего, отметить, что в общем случае со стороны ведущего вала возникают две зоны – зона прилегания подложки к поверхности рабочего вала и зона ее провисания, расположенная на входе в очаг уплотнения. При этом координата отрыва подложки от бочки вала  $x_{omp}$  определяется при прочих равных условиях жесткостью металлической оболочки.

В зоне прилегания, что математически описывается условием  $x < x_{omp}$ , величина обжатия определяется также исходя из геометрии системы:

$$\Delta h_{x2} = R_2 + h_n - \sqrt{(R_2 + h_n)^2 - x^2}. \quad (4)$$

Для описания величины  $\Delta h_{x2}$  в зоне провисания ( $x > x_{omp}$ ), потребуется более сложная зависимость, состоящая из трех компонент:

$$\Delta h_{x2} = \Delta h_{x2}^1 + \Delta h_{x2}^2 + \Delta h_{x2}^3, \quad (5)$$

где эти составляющие имеют следующий смысл:

$$\Delta h_{x2}^1 = (R_2 + h_n) \left[ 1 - \cos \left( \arcsin \frac{x_{omp}}{R_2 + h_n} \right) \right] - \text{геометрическая координата точки отрыва}$$

оболочки;

$$\Delta h_{x2}^2 = (x - x_{omp}) \cdot \operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{x_{omp}}{R_2 + h_n} \right) - \text{координата оси оболочки, как жесткого;}$$

$$\Delta h_{x2}^3 = W_x - \text{прогиб металлической оболочки от недеформированного состояния [7]:}$$

$$W_x = \frac{p_x b (L_{nl} - x_{omp})^5}{120 E_n I} \left[ 4 - 5 \frac{L_{nl} - x}{L_{nl} - x_{omp}} + \left( \frac{L_{nl} - x}{L_{nl} - x_{omp}} \right)^5 \right], \quad (6)$$

здесь  $E_n$  – модуль упругости материала металлической оболочки;

$I$  – момент инерции сечения металлической оболочки относительно оси  $x$  [6, 7]:

– для оболочек коробчатого и прямоугольного сечения (рис. 3, а–б):

$$I = \left( (B + 2b_1)H^3 - b(H - h_n)^3 - 2b_1(H - h_n)^3 \right) / 12; \quad (7)$$

– для металлической подложки (рис. 3, в):

$$I = B h_n^3 / 12, \quad (8)$$

где  $B, H, b, b_1, h_n$  – геометрические параметры сечения металлической оболочки (рис. 3).

Используя метод дихотомии, определяется длина очага уплотнения в связи с возникновением функциональной зависимости текущей высоты очага уплотнения и его общей протяженностью. Внутри цикла дихотомии осуществляется последовательное итерационное определение координаты точки отрыва полосы от поверхности вала на основании соответствия упруго-деформационного и чисто геометрического решений. Принимаем  $x_{omp} = x_i$ ,

$p_x|_{x=x_{omp}} = p_{xi}$ . Уравнение нахождения координаты точки отрыва  $x_{omp}$  в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta h_{x2} = & \sqrt{(R_2 + h_n)^2 - x_i^2} - \sqrt{(R_2 + h_n)^2 - x_{(i-1)}^2} = [x_{(i-1)} - x_i] \cdot \operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{x_i}{R_2 + h_n} \right) + \\ & + \frac{p_{xi} b (L_{nl} - x_i)^5}{120 E_n I} \left[ 4 - 5 \frac{L_{nl} - x_{(i-1)}}{L_{nl} - x_i} + \left( \frac{L_{nl} - x_{(i-1)}}{L_{nl} - x_i} \right)^5 \right] = \delta h_{x1}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $i$  – порядковый номер элементарного сечения.

Далее производится расчет величины толщины насыпного слоя на входе в зону уплотнения, т. е. при  $x=L_{nl}$  с учетом ранее определенной координаты точки отрыва. При этой операции направление решения меняется и становится противонаправленным движению композиции. Расчетная величина обжатия определяется по формуле:

$$h_{x2}|_{x=L_{nl}} = h_1 + R_1 \left[ 1 - \cos \left( \arcsin \frac{L_{nlk}}{R_1} \right) \right] + (R_2 + h_n) \left[ 1 - \cos \left( \arcsin \frac{x_{omrk}}{R_2 + h_n} \right) \right] + (L_{nlk} - x_{omrk}) \cdot \operatorname{tg} \left( \arcsin \left( \frac{x_{omrk}}{R_2 + h_n} \right) \right) + \left[ \frac{4p_{xk}|_{x=x_{omrk}} b (L_{nlk} - x_{omrk})^5}{120E_n I} \right]. \quad (10)$$

Заданное значение исходной толщины порошкового слоя сравнивается с величиной, определенной по формуле (10). При следующих начальных условиях:

$$L_{0 \max k}|_{k=1} = \sqrt{2R_1 \Delta h (R_2 + h_n) / (R_1 + R_2 + h_n)}; \quad (11)$$

$$L_{0 \min k}|_{k=1} = \sqrt{2R_1 \Delta h},$$

в решении используются следующие зависимости:

$$L_{nlk} = (L_{0 \min k} + L_{0 \max k}) / 2;$$

$$\left. \begin{aligned} L_{0 \min(k+1)} &= L_{nl} \\ L_{0 \max(k+1)} &= L_{0 \max k} \end{aligned} \right\} \text{при } h_{xk}|_{x=L_{nlk}} < h_0;$$

$$\left. \begin{aligned} L_{0 \min(k+1)} &= L_{0 \min k} \\ L_{0 \max(k+1)} &= L_{nl} \end{aligned} \right\} \text{при } h_{xk}|_{x=L_{nlk}} > h_0, \quad (12)$$

где  $k$  – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры.

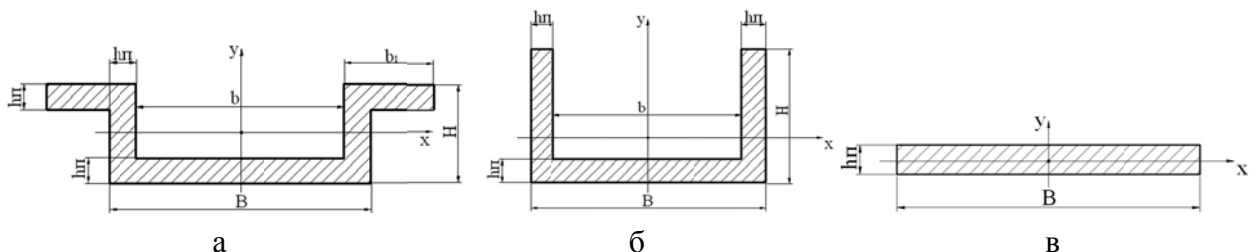


Рис. 3. Расчетные схемы сечений металлических оболочек:

а – оболочка коробчатого сечения; б – оболочка прямоугольного сечения; в – подложка

Со стороны ведущего вала скорость движения прокатываемой порошковой композиции синхронизирована со скоростью оболочки, поэтому зона опережения со стороны рабочего ведущего вала отсутствует  $L_{on2} = 0$ . В этом случае, основываясь на выражении [8], длину зоны опережения на ведомом валке можно определить зависимостью:

$$L_{on1} = L_{nl} \sqrt{h_1 (k_v - 1) / (h_0 - h_1)}, \quad (13)$$

где  $k_v = k_{v1} k_{v2}$  – обобщенный показатель соотношения окружных скоростей на контактных поверхностях подложки и ведомого рабочего вала, определяемый показателями кинематической  $k_{v1} = V_{e1} / V_{e2}$  и геометрической  $k_{v2} = (R_2 + h_n) / R_1$  асимметрии.

Также определению подлежит величина длины дуги контакта рабочего вала  $R_2$  и металлической оболочки порошковой электродной ленты:

$$L_{dyg} = \sqrt{R_2^2 - (R_2 - \Delta h_{x2})^2}. \quad (14)$$

В целом, рассмотренные аналитические решения наряду с использованием зависимостей для определения компонент напряженного состояния и плотности порошкового сердечника [6], а также итерационной процедурой определения протяженности очага деформации, составили полный алгоритм по численному одномерному математическому моделированию напряженно-деформированного состояния при прокатке порошкового сердечника в металлических оболочках различных форм и толщин.

В качестве примера результата численной реализации программных средств, разработанных на основе полученной математической модели, на рис. 4 представлены расчетные распределения нормальных и нормальных контактных напряжений по длине дуги контакта рабочего вала и металлической оболочки (рис. 4, а), а также распределения относительной плотности порошкового сердечника и значений упругого прогиба металлической оболочки по длине очага деформации (рис. 4, б) в зависимости от изменения коэффициента асимметрии.

Расчеты выполнены для прокатки железного порошка марки ПЖРЗ с начальной толщиной слоя 2,6 мм в валах диаметром 100 мм со скоростью прокатки 0,03 м/с и обжатием 0,3. Геометрические параметры ленты:  $h_n = 1$  мм,  $B = 20$  мм,  $b_1 = 3$  мм,  $b = 18$  мм. Высота профиля оболочки коробчатого сечения  $H = 3$  мм.

На рис. 5 показаны расчетные распределения нормальных и нормальных контактных напряжений по длине очага деформации в зависимости от изменения обжатия.

Было исследовано влияние формы и толщины металлических оболочек на параметры напряженного состояния процесса прокатки порошковых лент. В результате получены расчетные распределения относительной плотности порошкового сердечника и значений упругого прогиба металлической оболочки по длине очага деформации в зависимости от формы оболочки (рис. 6) и изменения упругого прогиба металлической оболочки коробчатого сечения по длине очага деформации в зависимости от толщины оболочки (рис. 7). Принято, что для оболочки прямоугольного сечения (рис. 3, б)  $H = 12$  мм.

Из анализа полученных распределений можно сделать выводы, что:

- величины нормальных напряжений  $\sigma_x$  носят знакопеременный характер при значениях показателя асимметрии больше 1,05 (рис. 4, а);
- после прохождения середины очага деформации, значения нормальных напряжений  $\sigma_x$  монотонно убывают (рис. 5);
- нормальные контактные напряжения  $P_x$  достигают своего максимального значения в последних сечениях, т.е. на выходе из очага деформации (рис. 4, а; рис. 5);
- наименьшие значения длины дуги контакта рабочего вала и металлической оболочки будут при  $k_v = 1,15$ ; наибольшие – при  $k_v = 1$  (рис. 4, а);
- по мере прохождения очага деформации относительная плотность  $\gamma_x$  монотонно возрастает и происходит стабилизация роста на выходе из зоны деформации (рис. 4, б; рис. 6);
- максимальные значения плотности порошкового сердечника достигаются при использовании оболочки коробчатого сечения, минимальные – для прямоугольной оболочки;
- упругий прогиб металлической оболочки будет равен нулю практически по всей длине очага деформации, и только на выходе из него появляется упругий прогиб, который будет тем выше, чем меньше жесткость оболочки;
- максимальное значение упругого прогиба оболочки получено для прямоугольного сечения, наименьший же упругий прогиб будет при использовании металлической подложки (рис. 6);
- максимальное значение упругого прогиба оболочки получено для  $k_v = 1$  и  $h = 0,25$  мм, наименьший же упругий прогиб будет при  $k_v = 1,15$  и  $h = 1$  мм (рис. 4, б; рис. 7).

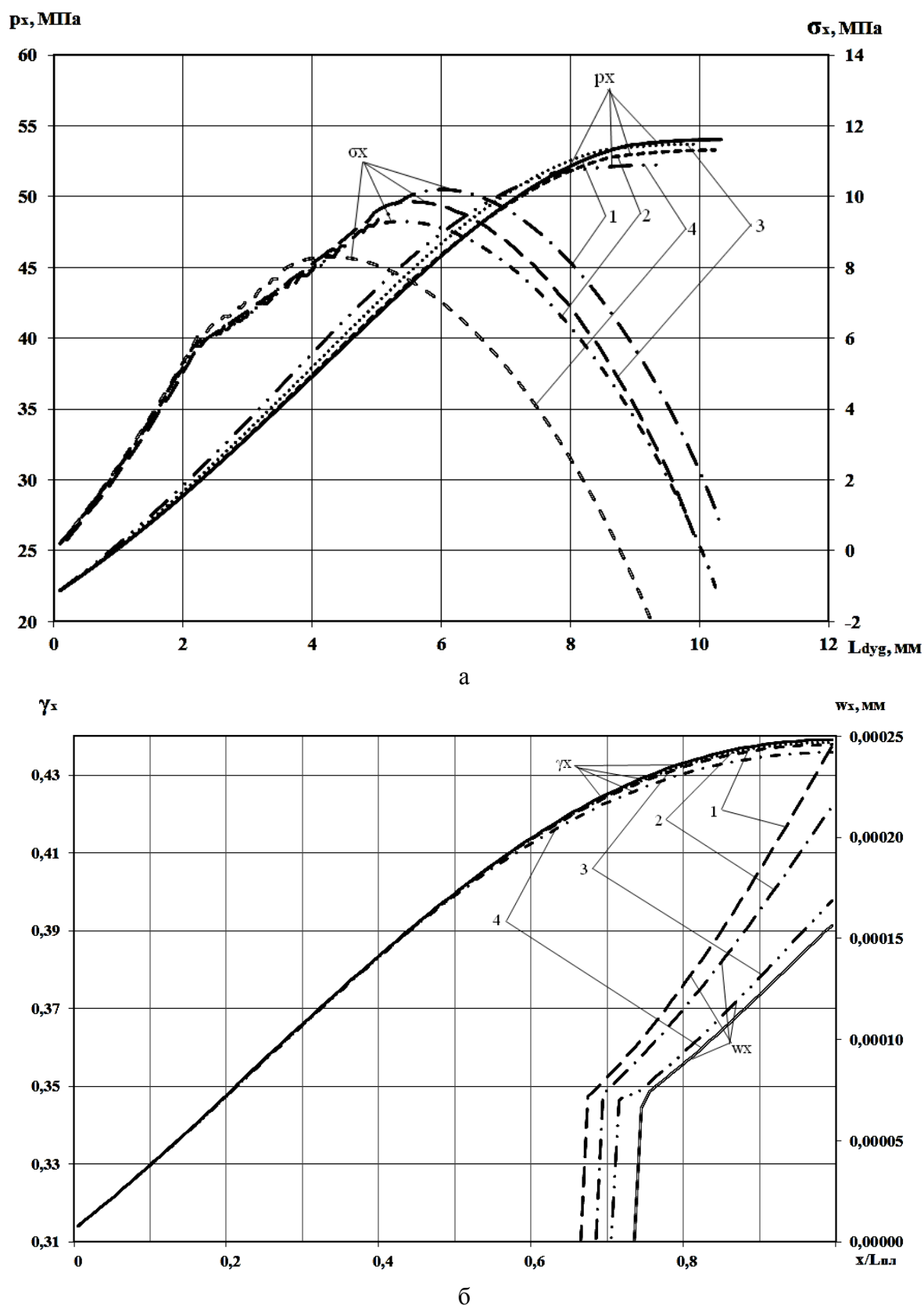


Рис. 4. Расчетные распределения нормальных и нормальных контактных напряжений по длине дуги контакта рабочего вала и металлической оболочки (а) и распределения относительной плотности порошкового сердечника и значений упругого прогиба металлической оболочки по длине очага деформации (б) в зависимости от изменения коэффициента асимметрии:

$$1 - k_v = 1; 2 - k_v = 1,05; 3 - k_v = 1,1; 4 - k_v = 1,15$$

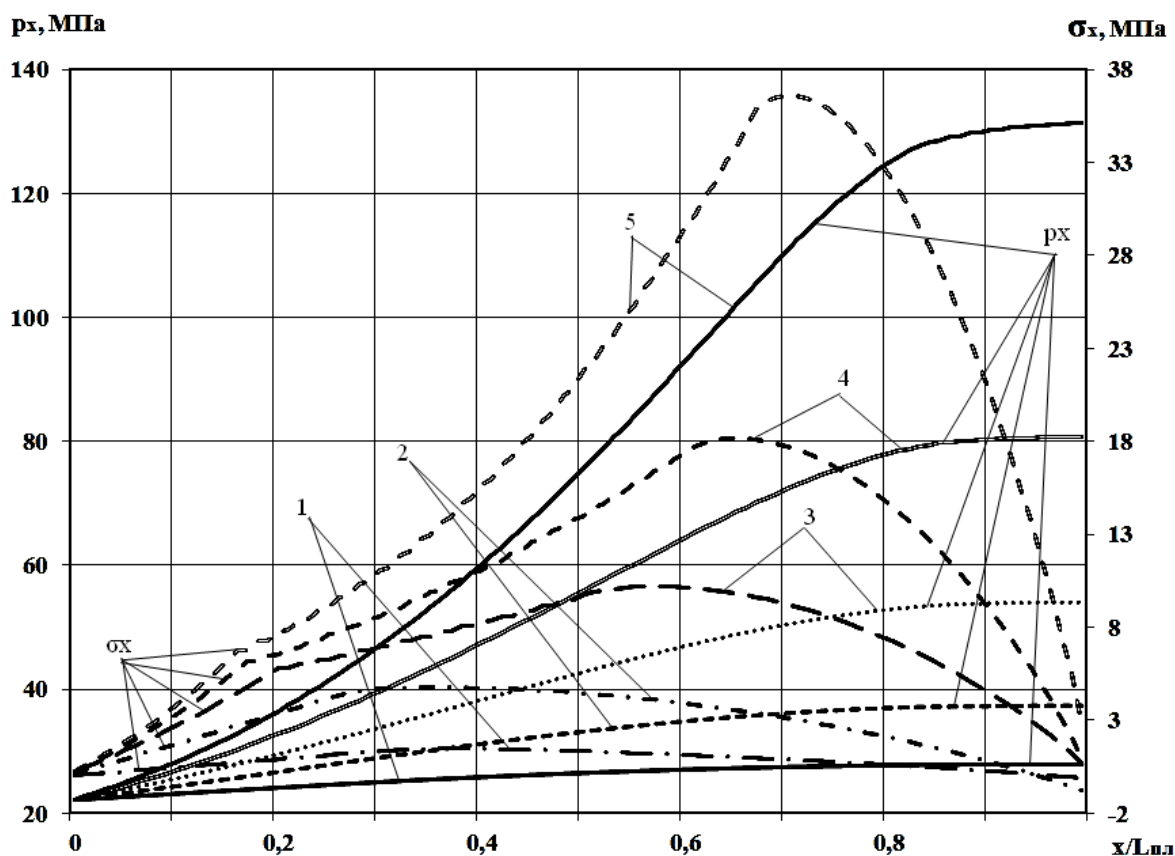


Рис. 5. Расчетные распределения нормальных и нормальных контактных напряжений по длине очага деформации в зависимости от изменения обжатия:

1 –  $\varepsilon = 0,1$ ; 2 –  $\varepsilon = 0,2$ ; 3 –  $\varepsilon = 0,3$ ; 4 –  $\varepsilon = 0,4$ ; 5 –  $\varepsilon = 0,5$

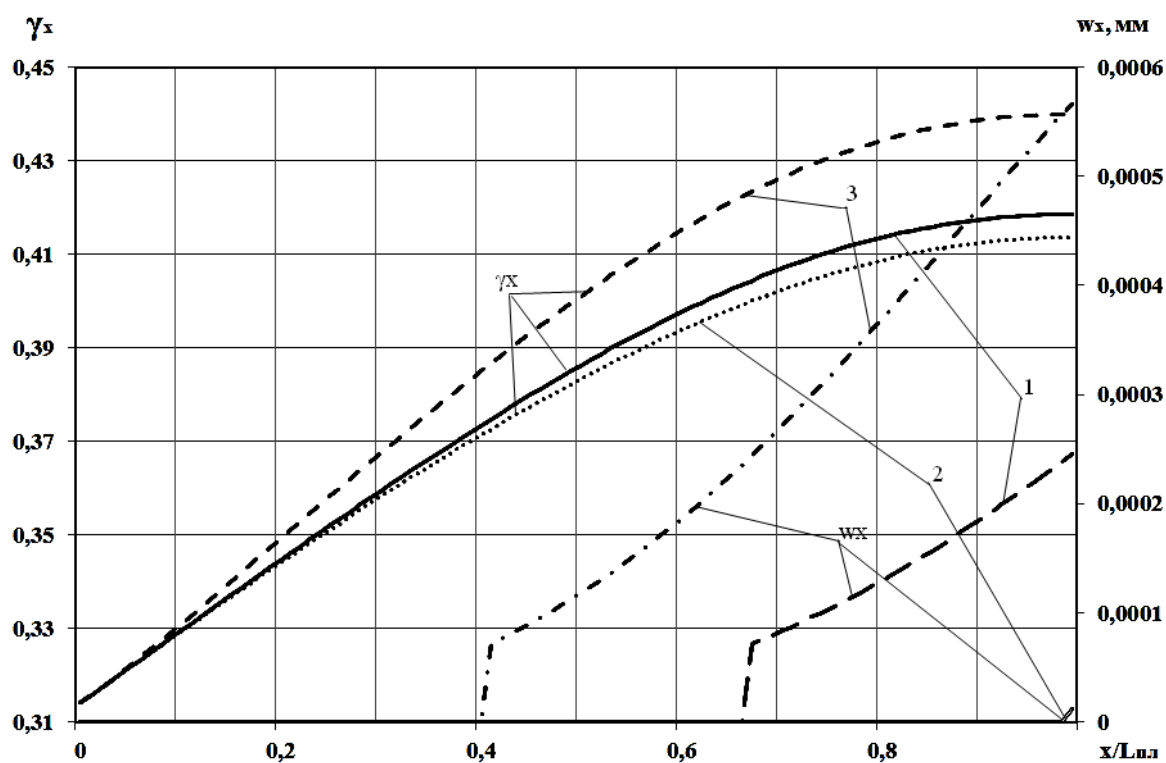


Рис. 6. Расчетные распределения относительной плотности порошкового сердечника и значений упругого прогиба металлической оболочки по длине очага деформации в зависимости от изменения формы оболочки:

1 – коробчатая оболочка; 2 – прямоугольная оболочка; 3 – подложка

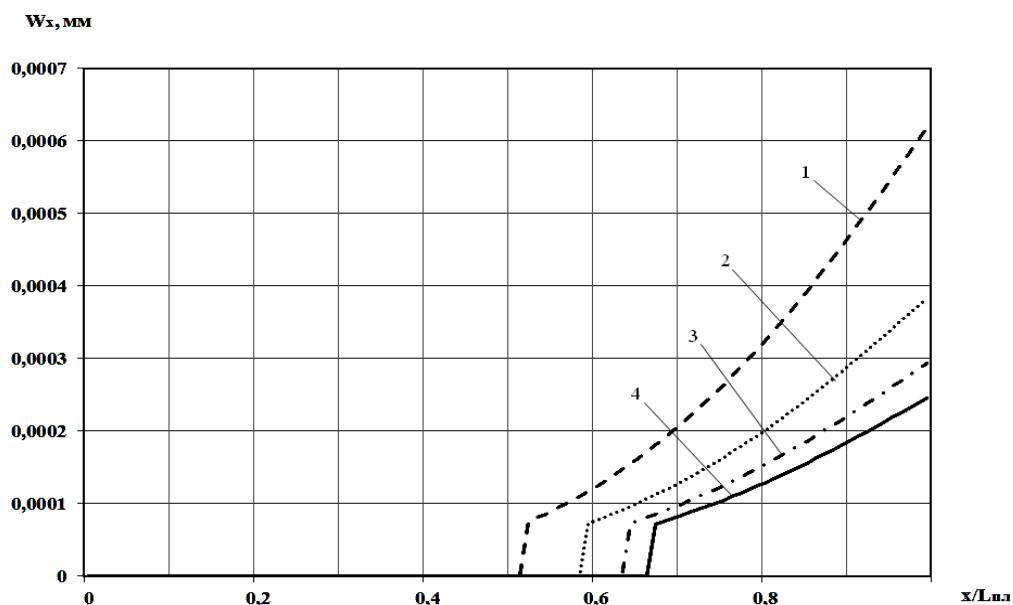


Рис. 7. Расчетные распределения упругого прогиба металлической оболочки по длине очага деформации в зависимости от изменения толщины оболочки:

1 –  $h = 0,25$  мм; 2 –  $h = 0,5$  мм; 3 –  $h = 0,75$  мм; 4 –  $h = 1$  мм

### ВЫВОДЫ

Получила развитие математическая модель напряженно-деформированного состояния металла процесса прокатки порошкового сердечника в различных металлических оболочках, которая позволила учесть влияние формы металлической оболочки на геометрические и энергосиловые параметры процесса прокатки порошковых электродных лент, а также физико-механические свойства порошкового сердечника.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Наплавочные порошковые ленты и проволоки. Справочник* / П. В. Гладкий, И. А. Кондратьев, В. И. Юматова, А. П. Жудра. – К. : Техніка, 1991. – 36 с.
2. *Чигарев В. В. Производство и применение порошковых лент для наплавки износостойких сплавов* / В. В. Чигарев // *Автоматическая сварка*. – 1994. – № 2. – С. 51–52.
3. *Чигарев В. В. Износостойкая наплавка порошковой лентой* / В. В. Чигарев, А. Г. Белик, Т. Н. Филиппенко // *Сборник научных работ национального университета кораблестроения*. – 2009. – № 3. – С. 168–175.
4. *Жудра А. П. Износостойкая наплавка порошковыми лентами* / А. П. Жудра, А. П. Ворончук // *Сварщик*. – 2010. – № 6. – С. 6–10.
5. *Грибков Э. П. Исследование локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла при уплотнении порошкового сердечника в металлической оболочке* / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 53–59.
6. *Грибков Э. П. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке порошковых материалов* / Э. П. Грибков, Ю. А. Воробьев // *Наука, производство, предпринимательство – развитию металлургии : сб. науч. тр.* – Донецк, 1998. – С. 151–156.
7. *Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов* / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К. : Наукова думка, 1973. – 704 с.
8. *Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке порошковых материалов* / В. Ф. Потапкин, А. М. Лаптев, С. М. Романов, А. В. Сатонин // *Сборник научных статей*. – Краматорск : ДГМА, 1994. – Вып. 2. – С. 3–15.

Грибков Э. П. – канд. техн. наук, доц. каф. АММ ДГМА;

Данилюк В. А. – аспирант ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: [amm@dgma.donetsk.ua](mailto:amm@dgma.donetsk.ua)

Статья поступила в редакцию 15.02.2013 г.