

УДК 621.762.047

Грибков Э. П.
Данилюк В. А.**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ
УПЛОТНЕНИИ ПОРОШКОВОГО СЕРДЕЧНИКА В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ**

В настоящее время порошковая лента – хорошо известный наплавочный материал, который широко применяется при изготовлении и упрочнении большой номенклатуры деталей в металлургической, энергетической, горнодобывающей, дорожно-строительной и других областях промышленности. В отличие от порошковой проволоки основным преимуществом использования порошковых лент является высокая производительность наплавки и возможность высокой степени легирования наплавленного металла. Для наплавки износостойких сплавов применяются в больших объемах порошковые электродные ленты, которые имеют в сечении форму, близкую к прямоугольнику [1–2]. Уплотнение сердечника в металлической оболочке обеспечивается путем совместного их обжатия при прокатке в двухвалковой клети стана. Подготовка смеси компонентов (сердечника и шихты) и формирование ленты прокаткой на стане – это два процесса, которые в основном определяют стабильность сварочно-технологических свойств порошковой электродной ленты и качество наплавленного слоя.

Решение задачи о прокатке исключительно порошковой среды получено авторами работы [3] для случая свободного поступления порошка в очаг деформации. В работе [4] были рассмотрены математические модели для прокатки однослойных порошков на металлической подложке. Размеры и форма сечения металлической оболочки порошковой электродной ленты существенно видоизменяет геометрические характеристики и условия протекания деформации при прокатке. Отмеченное делает актуальным дальнейшее развитие математических моделей, позволяющих определить количественные характеристики основных параметров процессов производства порошковых лент.

Целью работы является развитие математического аппарата для определения локальных и интегральных характеристик основных параметров напряженно-деформированного состояния металла при прокатке порошкового сердечника в металлической оболочке в очаге деформации.

В основу одномерной математической модели процесса уплотняющей прокатки порошкового сердечника в металлической оболочке была положена математическая модель процесса прокатки однослойных порошковых материалов на металлической подложке [4]. Модель основана на разбиении зоны уплотнения на конечное множество элементарных объемов и определение геометрических характеристик, а также напряжений σ_x , τ_x и P_x в конечно-разностной форме. Используемая в этом случае расчетная схема интегрального очага деформации представлена на рис. 1.

При определении значения толщины полосы h_x использовали параболическую аппроксимацию контактных дуг:

$$h_x = h_1 + (h_0 - h_1) \left(\frac{x}{L_{nl}} \right)^2, \quad (1)$$

где h_1 – конечная толщина получаемой порошковой составляющей заготовки;

h_0 – исходная толщина порошкового слоя композиции;

L_{nl} – протяженность зоны уплотнения.

Условие статического равновесия элементарного объема очага деформации имеет вид [4]:

$$\begin{aligned} \Sigma F_{xi} = & \sigma_{xi1}h_{xi1} - \sigma_{xi2}h_{xi2} - \frac{(p_{xi1} + p_{xi2})(h_{xi1} + h_{xi2})}{2} \Delta x + \\ & + \frac{p_{xi1}f_{xi11} + p_{xi2}f_{xi12}}{2} \Delta x + \frac{p_{xi1}f_{xi21} + p_{xi2}f_{xi22}}{2} \Delta x = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

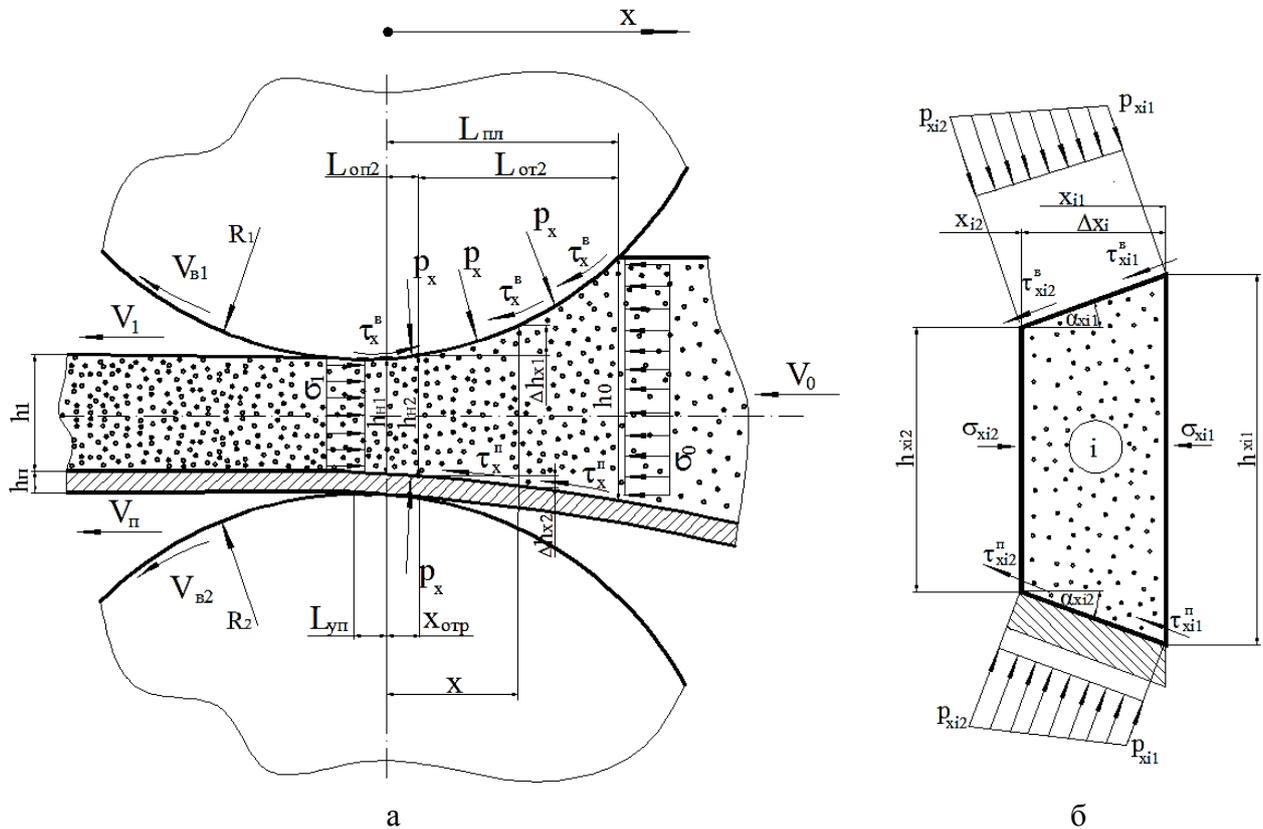


Рис. 1. Расчетная схема очага деформации и выделенного *i*-го элементарного объема при реализации процесса прокатки порошкового материала в металлической оболочке

Нормальное напряжение σ_{xi2} выражаем через нормальное контактное напряжение p_{xi} , исходя из условия пластичности для сыпучих сред [5], и подставив его в уравнение статического равновесия (6), определяем нормальные контактные напряжения:

$$p_{xi2}^2(t_{i1}^2 - t_{i3}) + 2p_{xi2}t_{i1}t_{i2} + t_{i2}^2 - t_{i4} = 0, \quad (3)$$

$$\text{где } t_{i1} = \frac{1 - 2\alpha_{xi2}}{1 + 4\alpha_{xi2}} h_{xi2} + \frac{1}{2} [h_{xi1} - h_{xi2} - (f_{xi21} + f_{xi22})\Delta x]; \quad (4)$$

$$t_{i2} = \frac{1}{2} p_{xi1} [h_{xi1} - h_{xi2} - (f_{xi11} + f_{xi21})\Delta x] - \sigma_{xi1}h_{xi1}; \quad (5)$$

$$t_{i3} = \left[\left(\frac{1 - 2\alpha_{xi2}}{1 + 4\alpha_{xi2}} \right)^2 - 1 \right] h_{xi2}^2; \quad (6)$$

$$t_{i4} = \frac{4}{3} \cdot \frac{1 + \alpha_{xi2}}{1 + 4\alpha_{xi2}} h_{xi2}^2 \beta_{x2} \sigma_{sx}^2. \quad (7)$$

Текущие значения относительной плотности порошковых композиций в металлической оболочке коробчатого сечения определяются аналогично по методике, изложенной в работе [4]. Для этого, воспользовавшись зависимостями между главными скоростями пластической деформации $\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_3$ и главными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ предоставляемыми теорией течения пористых материалов, результирующее в рамках данного объема значение относительной плотности порошковой среды может быть определено как:

$$\gamma_{xi2} = \gamma_{xi1} h_{xi1} / [h_{xi2} (1 + \varepsilon_{xi})] \quad (8)$$

Для i -го выделенного элементарного объема данного случая прокатки (см. рис. 1, б) [4–5]:

$$\varepsilon_{xi} = \frac{\sigma_{xi2} (1 + 4\alpha_{xi2}) - p_{xi2} (1 - 2\alpha_{xi2})}{p_{xi2} (1 + 4\alpha_{xi2}) - \sigma_{xi2} (1 - 2\alpha_{xi2})} \cdot \frac{h_{xi1} - h_{xi2}}{h_{xi1}}. \quad (9)$$

Исходя из условия сохранения массы, результирующее в рамках данного объема, значение относительной плотности порошковой среды определяется по формуле [4–5]:

$$\gamma_{xi2} = \gamma_{xi1} \frac{h_{xi1}}{h_{xi2} (1 + \varepsilon_{xi})}. \quad (10)$$

В процессе прокатки часть металлической оболочки под действием нормальных контактных напряжений p_x будет плотно прижата к образующей поверхности рабочего вала, а оставшаяся часть не будет контактировать с валком, вследствие определенной жесткости оболочки. Исходя из этого, расчетную схему оболочки можно представить в виде консольной балки с жестким защемлением в сечении, соответствующем точке отрыва оболочки x_{omp} от рабочего вала (рис. 1, а).

Для описания величины текущей толщины композиции используют трехчленную зависимость [8]:

$$h_{x1} = h_1 + \Delta h_{x1} + \Delta h_{x2}, \quad (11)$$

где Δh_{x1} и Δh_{x2} – текущие значения абсолютных обжатий со стороны ведущего и ведомого рабочих валков. Величина абсолютного обжатия со стороны ведомого вала описывается зависимостью геометрического характера:

$$\Delta h_{x2} = R_2 - \sqrt{R_2^2 - x^2}. \quad (12)$$

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

$$\Delta h_{x1} = R_1 + h_n - \sqrt{(R_1 + h_n)^2 - x^2}. \quad (13)$$

Для описания величины Δh_{x1} в зоне провисания ($x < x_{omp}$), потребуется более сложная зависимость [8], состоящая из трех компонент:

$$\Delta h_{x1} = \Delta h_{x1}^1 + \Delta h_{x1}^2 + \Delta h_{x1}^3, \quad (14)$$

где эти составляющие имеют следующий смысл:

$$\Delta h_{x1}^1 = (R_1 + h_n) \left[1 - \cos \left(\arcsin \frac{x_{omp}}{R_1 + h_n} \right) \right] - \text{геометрическая координата точки отрыва}$$

оболочки;

$$\Delta h_{x1}^2 = (x - x_{omp}) \cdot \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{x_{omp}}{R_1 + h_n} \right) - \text{координата оси оболочки, как жесткого;}$$

$$\Delta h_{x1}^3 = W_x - \text{прогиб металлической оболочки от недеформированного состояния.}$$

Текущее значение упругого прогиба металлической оболочки на данном участке, согласно рекомендациям работы [8], может быть определено как:

$$W_x = \frac{p_x b (L_{nl} - x_{omp})^5}{120 E_n I} \left[4 - 5 \frac{L_{nl} - x}{L_{nl} - x_{omp}} + \left(\frac{L_{nl} - x}{L_{nl} - x_{omp}} \right)^5 \right]; \quad (15)$$

где h – толщина оболочки на её свободном участке;

E_n – модуль упругости материала металлической оболочки;

I – момент инерции сечения металлической оболочки относительно оси x [8]:

– для оболочек коробчатого и прямоугольного сечения (рис. 2, а–б):

$$I = \frac{(B + 2b_1)H^3 - b(H - h)^3 - 2b_1(H - h)^3}{12}; \quad (16)$$

– для металлической подложки (рис. 2, в):

$$I = \frac{Bh^3}{12}, \quad (17)$$

здесь B, H, b, b_1, h – геометрические параметры сечений металлических оболочек (рис. 2).

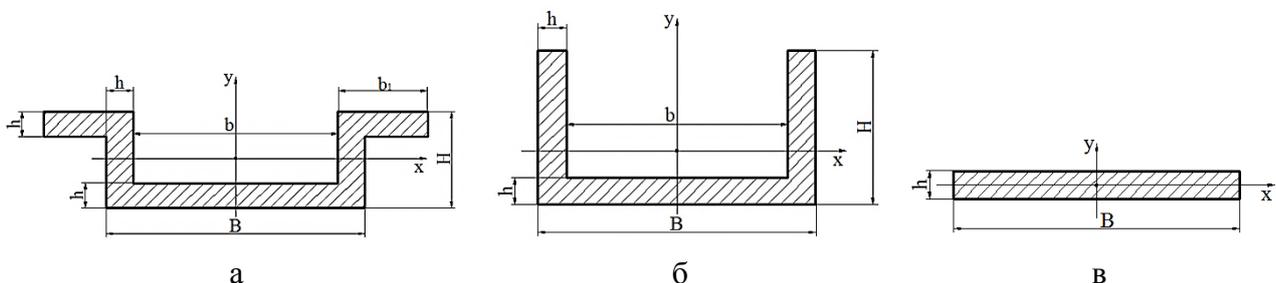


Рис. 2. Расчетные схемы сечений металлических оболочек

Используя метод дихотомии [9] определяется длина очага уплотнения. 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:

$$\delta h_{x1} = \sqrt{(R_1 + h_n)^2 - x_i^2} - \sqrt{(R_1 + h_n)^2 - x_{(i-1)}^2} = [x_{(i-1)} - x_i] \cdot \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{x_i}{R_1 + h_n} \right) + \frac{p_{xi} b (L_{nl} - x_i)^5}{120 E_n I} \left[4 - 5 \frac{L_{nl} - x_{(i-1)}}{L_{nl} - x_i} + \left(\frac{L_{nl} - x_{(i-1)}}{L_{nl} - x_i} \right)^5 \right] = \delta h_{x2}, \quad (18)$$

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:

$$h_{x1}|_{x=L_{nl}} = h_1 + R_2 \left[1 - \cos \left(\arcsin \frac{L_{nlk}}{R_2} \right) \right] + (R_1 + h_n) \left[1 - \cos \left(\arcsin \frac{x_{omrk}}{R_1 + h_n} \right) \right] + (L_{nlk} - x_{omrk}) \cdot \operatorname{tg} \left(\arcsin \left(\frac{x_{omrk}}{R_1 + h_n} \right) \right) + \left[\frac{4 p_{xk}|_{x=x_{omrk}} b (L_{nlk} - x_{omrk})^5}{120 E_n I} \right]. \quad (19)$$

Заданное значение исходной толщины порошкового слоя сравнивается с величиной, определенной по формуле (19). При следующих начальных условиях:

$$L_{0 \min k}|_{k=1} = \sqrt{2(R_1 + h_n) R_2 \Delta h / (R_1 + R_2 + h_n)}; \quad (20)$$

$$L_{0 \max k}|_{k=1} = \sqrt{2 R_2 \Delta h},$$

в решении используются следующие зависимости:

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

$$\left. \begin{array}{l} L_{0 \min(k+1)} = L_{nl} \\ L_{0 \max(k+1)} = L_{0 \max k} \end{array} \right\} \text{при } h_{xk}|_{x=L_{nlk}} < h_0; \quad (21)$$

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

где k – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры.

Напряженно-деформированное состояние в очаге уплотнения определяется как:

$$\delta h_1 = \frac{h_1 p_{x2}|_{i=kr}}{E_{n2}}, \quad (22)$$

где E_{n2} – модуль упругости прокатанной порошковой композиции.

Окончательная толщина порошкового слоя с учетом упругого восстановления составит:

$$h_k = h_1 + \delta h_1. \quad (23)$$

Длину зоны упругого восстановления определяют по формуле:

$$L_{yn} = \sqrt{2(R_1 + h_n)R_2\delta h_1 / (R_1 + R_2 + h_n)}, \quad (24)$$

где R_1 и R_2 – радиусы ведущего и ведомого рабочих валков (см. рис. 1).

В целом зависимости (1)–(24) составили полный алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния при прокатке порошкового материала в металлической оболочке.

В качестве примера результата численной реализации программных средств, разработанных на основе полученной математической модели, на рис. 3 представлены расчетные распределения относительной плотности слоя порошка γ_x (рис. 3, а) и упругого прогиба металлической оболочки W (рис. 3, б) по длине очага деформации в зависимости от обжатия ε процесса прокатки однослойной порошковой ленты в металлической оболочке коробчатого сечения. Также получены расчетные распределения упругого прогиба металлической ленты W на выходе из зоны деформации в зависимости от толщины h и формы металлической оболочки при обжатии $\varepsilon = 0,5$ (рис. 4).

Расчеты выполнены для прокатки железного порошка марки ПЖРЗ с начальной толщиной слоя 2,6 мм в валках диаметром 50 мм со скоростью прокатки 0,03 м/с. Геометрические параметры ленты: $h = 1$ мм, $B = 20$ мм, $b_1 = 3$ мм, $b = 18$ мм. Высота ленты для оболочки коробчатого сечения (рис. 2, а) $H = 3$ мм, для оболочки прямоугольного сечения (рис. 2, б) $H = 12$ мм.

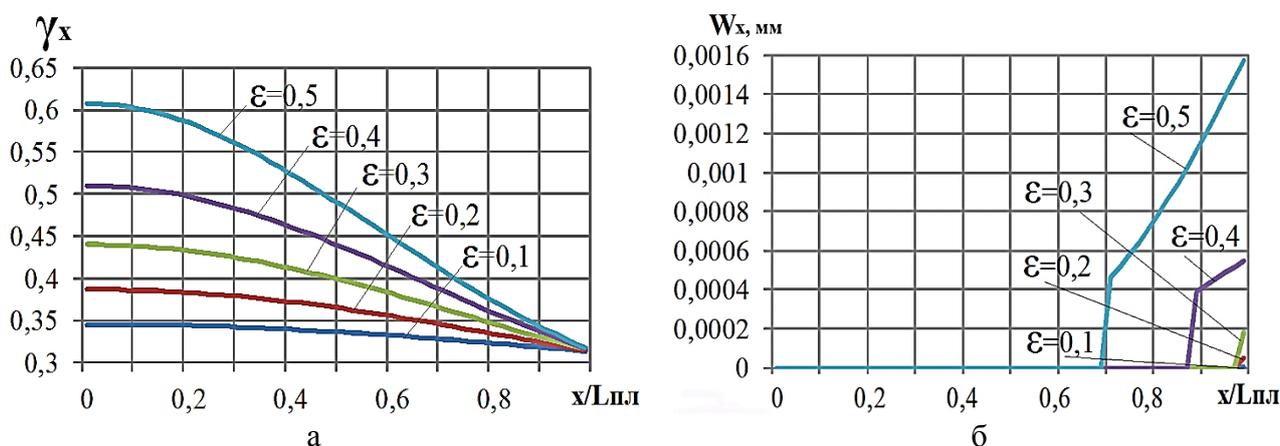


Рис. 3. Расчетные распределения относительной плотности слоя порошка (а) и упругого прогиба металлической оболочки (б) по длине очага деформации в зависимости от обжатия при уплотнении порошкового сердечника электродной ленты в металлической оболочке коробчатого сечения

Из анализа представленных расчетных распределений видно, что при уплотняющей прокатке порошкового сердечника в металлической оболочке происходит интенсивный рост конечной относительной плотности порошкового материала и стабилизация роста на выходе из зоны деформации. Общая толщина ленты в процессе прокатки интенсивно снижается практически по всей длине очага деформации. Проведенные расчеты показывают, что 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 больше обжатие. Также имеет место увеличение упругого прогиба с уменьшением толщины металлической оболочки. Максимальное значение упругого прогиба оболочки получено при толщине ленты прямоугольного сечения в 0,25 мм, наименьший же упругий прогиб будет при использовании металлической подложки толщиной 1 мм.

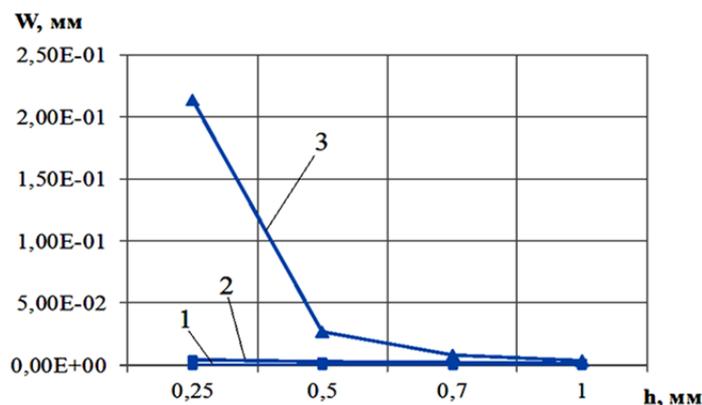


Рис. 4. Расчетные распределения упругого прогиба металлической ленты на выходе из очага деформации в зависимости от толщины металлической оболочки при обжати $\varepsilon = 0,5$ при реализации процесса прокатки порошковой электродной ленты в металлической оболочке коробчатого (1), прямоугольного сечения (2) и на металлической подложке (3)

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния и геометрических характеристик при реализации процесса уплотняющей прокатки порошкового сердечника в металлической оболочке различного сечения, которая позволяет с большей точностью спрогнозировать энергосиловые параметры, геометрические и физико-механические характеристики при прокатке порошковой электродной ленты. Также получены зависимости для решения и определения упругих прогибов различных металлических оболочек в процессе прокатки порошковой ленты в оболочке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Износостойкая наплавка ленточным порошковым электродом / О. А. Бакиш, Е. С. Белоусов, Г. П. Клековкин и др. // *Сварочное производство*. – 1960. – № 3. – С. 30–33.
2. Чигарев В. В. Производство и применение порошковых электродных лент для наплавки износостойких сплавов / В. В. Чигарев // *Автоматизированная сварка*. – 1994. – № 2. – С. 51–52.
3. Потапкин В. Ф. Напряженное состояние и кинематика при прокатке порошковых материалов на металлической подложке / В. Ф. Потапкин, А. М. Левкин, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков // *Порошковая металлургия*. – 2000. – № 1/2. – С. 13–21.
4. Грибков Э. П. Напряженно-деформированное состояние при прокатке двухслойных порошковых материалов, один слой из которых является монометаллом / Э. П. Грибков, А. М. Кулик // *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії та машинобудуванні* : зб. наук. пр. – Краматорськ-Слов'янськ : ДДМА, 2000. – С. 138–141.
5. Прогрессивные технологические процессы штамповки деталей из порошков и оборудование / Г. М. Волкогон, А. М. Дмитриев, Е. П. Добряков [и др.]; под общ. ред. А. М. Дмитриева, А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1991. – 320 с. : ил.
6. Грибков Э. П. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке порошковых материалов / Э. П. Грибков, Ю. А. Воробьев // *Наука, производство, предпринимательство – развитию металлургии*. – Донецк : ЛИК, 1998. – С. 151–156.
7. Прокатка металлических порошков / Г. А. Виноградов, Ю. Н. Семенов, О. А. Катрус [и др.]. – М. : Металлургия, 1969. – 382 с.
8. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К. : Наукова думка, 1973. – 704 с.
9. Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.

Грибков Э. П. – канд. техн. наук, доц. кафедры АММ ДГМА;
Данилюк В. А. – аспирант ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 10.10.2012 г.