УДК 621.762.4.047

Грибков Э. П.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ ПОРОШКОВЫХ ЛЕНТ И ПРОВОЛОКИ

Порошковые ленты и полосы получили широкое распространение в качестве заготовок для подшипников скольжения. Данный вид продукции получается путем прокатки порошкового материала на металлической подложке. В сварочном производстве порошковые проволоки и ленты получили распространение за счёт того, что порошковый сердечник может иметь практически любой химический состав с включением различного содержания легирующих элементов. Порошковые проволоки и ленты являются универсальным электродным материалом. Данные электроды получают путём волочения, прокатки или плющения порошкового материала в металлической оболочке.

Одной из основных тенденций развития методов расчета процессов обработки давлением является использование максимально строгого аппарата, что применительно к симметричной прокатке порошковых материалов было сделано авторами работ [1, 2] на основе численного решения дифференциального уравнения равновесия. Вместе с тем, наличие в очаге деформации монометаллической подложки или оболочки несколько видоизменяет кинематические и геометрические параметры очага деформации.

Целью работы является разработка математического аппарата для моделирования процессов производства порошковых лент и проволоки на основе достаточного точного условия пластичности, одновременно позволяющего относительно просто описывать физико-механические свойства порошковых материалов различного состава.

В основу разработанных математических моделей напряженно-деформированного состояния при реализации процессов прокатки порошковой ленты, волочения и плющения порошковой проволоки был положен один подход, основанный на совместном численном рекуррентном решении условий статического равновесия и условий пластичности для порошкового сердечника.

Используемая в моделях расчётная схема представляла очаг деформации, разбитый на множество элементарных объёмов. Для каждого выделенного элементарного объёма рассматривались условия статического равновесия всех действующих сил, решение которых совместно с условиями пластичности (для плоского или осесимметричного напряженного состояния) и принятым законом трения позволило определить напряженное состояние в порошковом сердечнике. Помимо напряжений, для порошкового материала было определено распределение относительной плотности вдоль очага деформации.

В данных моделях использовалось условие пластичности для пористых материалов [3]:

$$f = \frac{1}{2}\cdot\left[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2\right]+\alpha\cdot(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)^2-\beta\cdot\sigma_s^2=0, \qquad (1)$$

где σ_1, σ_2, σ_3 – главные напряжения, действующие на деформируемый порошковый сердечник.

Коэффициенты α и β в свою очередь определяются по формуле [3]:

$$\alpha = a(1-\gamma)^m;\ \beta=\gamma^{2n}, \qquad (2)$$

где γ – относительная плотность порошковой композиции, определяемая как:

$$\gamma = \rho / \rho_м, \qquad (3)$$

ρ – плотность исследуемой порошковой композиции;

$\rho_м$ – плотность исследуемой композиции в ее монолитном состоянии;

a, m, n – постоянные коэффициенты, определяемые экспериментально для каждого типа порошковой композиции.

Для определения коэффициентов a, m, n использовалось устройство, выполненное в виде плавающей матрицы с цилиндрической внутренней поверхностью и двух пуансонов, сопряженных с силоизмерительным прессующим механизмом [4, 5]. Плавающая матрица выполнена разъемной, при этом обе её половины содержат проушины, посредством которых они сопряжены между собой при помощи болтовых соединений, оснащенных силоизмерительными кольцевыми месдозами. Устройство отличается также тем, что с целью повышения точности результатов экспериментальных исследований по оси внутреннего отверстия плавающей матрицы размещен центрирующий стержень диаметром:

$$D_c = D_м - 2h, \tag{4}$$

где $D_м$ – диаметр внутренней цилиндрической поверхности плавающей матрицы;

h – расстояние между пуансонами в их крайнем положении.

Использование центрирующего стержня данного диаметра позволяет исключить влияние касательных напряжений на контакте заготовки с пуансонами, а также на поверхности контакта заготовки и внутренней поверхности матрицы, так как в этом случае соотношение $(D_м–D_c)/(2h)$ равно единице [4].

Устройство работает следующим образом: под действием прессующего механизма верхний пуансон воздействует на порошковую композицию известной силой Y, под действием которой происходит деформация порошкового материала, которая, в свою очередь, вызывает радиальную силу F, измеряемую при помощи кольцевых месдоз. Непосредственно нормальные контактные p_i напряжения определяют в этом случае по формуле [4]:

$$p_i = \frac{4Y_i}{\pi\left(D_м^2 - D_c^2\right)}. \tag{5}$$

Для определения радиальных напряжений σ_{ri} рассматривалось условие равновесия при проецировании всех сил на горизонтальную плоскость:

$$F_i = \int_0^{\pi} \sigma_{ri} \cdot \sin\alpha \cdot R\, d\alpha \cdot h_i = \sigma_{ri} \cdot (-\cos\alpha) \cdot R\Big|_0^{180^\circ} \cdot h_i = 2 \cdot \sigma_{ri} \cdot R \cdot h_i = \sigma_{ri} \cdot D_м \cdot h_i, \tag{6}$$

из которого с учетом известного измеренного значения F_i величина σ_{ri} соответствует:

$$\sigma_{ri} = \frac{F_i}{h_i D_м}. \tag{7}$$

Определение коэффициента α_i осуществляется по формуле [3]:

$$\alpha_i = \frac{1 - \sigma_{ri} / p_i}{2\left(1 + 2\sigma_{ri} / p_i\right)}. \tag{8}$$

Коэффициенты β и σ_s определяются по следующей зависимости [3]:

$$\beta_i \sigma_s^2 = \frac{9\alpha_i}{1 + 4\alpha_i} p_i^2, \tag{9}$$

где последующее определение коэффициента β_i осуществляется на основе метода наименьших квадратов, исходя из допущения о постоянстве значения σ_s.

Затем производят измерение геометрических характеристик и массы получаемого образца, определяют значения его абсолютной и относительной плотности.

Зная зависимости коэффициентов α_i и β_i от относительной плотности γ_i, определяют коэффициенты a, m, n уравнения (2).

В качестве примера использования предлагаемой установки можно продемонстрировать определение механических свойств порошка бронзографита, содержащего 79 % меди, 15 % олова, 4 % свинца, 2 % графита. Устройство было установлено в станину рабочей клети прокатного стана, в качестве силового агрегата использовали нажимной винт. Технологическая сущность эксперимента заключалась в прессовании соответствующей порошковой композиции в закрытой матрице при различных, варьируемых по величине, значениях силы Y_i. Для определения механических свойств порошка одного состава достаточно одного опыта, так как использование сельсин-датчика, установленного на нажимном механизме, позволило определить текущую высоту испытуемой заготовки, соответствующую текущему значению силы прессования Y_i, то есть одним опытом заменялась целая их серия [6].

Из анализа полученных результатов является очевидным, что с увеличением силы прессования радиальные напряжения возрастают. По мере увеличения относительной плотности γ значения коэффициента α снижаются и снижаются практически линейно, что, в свою очередь, позволяет принять степенной показатель аналитического описания m равным единице. Количественная же оценка коэффициента a того же аналитического описания для данного материала составила $a = 1{,}737$ [6].

Значения коэффициента β с увеличением относительной плотности возрастают, асимптотически приближаясь к единице, что, в частности, соответствует условиям деформирования сплошных сред. Полученная же для бронзографита данного состава количественная оценка степенного показателя n в данном случае составила $n = 3{,}049$, а значение σ_s было равно 274 Н/мм^2 и именно эти значения могут быть использованы в качестве исходных данных при реализации различных математических моделей процессов деформации порошковых материалов [6].

В случае прокатки порошковых лент или плющения порошковой проволоки, то есть в случае плоского напряженного состояния главные напряжения в уравнении (1) равны [7]:

$$\sigma_1 = p_x\,,\ \sigma_2 = \frac{1-2\alpha}{2(1+\alpha)}(\sigma_1+\sigma_3) = \frac{1-2\alpha_x}{2(1+\alpha_x)}(p_x+\sigma_x), \sigma_3 = \sigma_x\,, \tag{10}$$

где индекс x означает текущее значение параметра вдоль оси прокатки;

σ_x, p_x – нормальные и нормальные контактные напряжения.

Подставив главные напряжения в условие пластичности (1), получим:

$$\frac{1}{2}\left[\left\{p_x - \frac{1-2\alpha_x}{2(1+\alpha_x)}(p_x+\sigma_x)\right\}^2 + \left\{\frac{1-2\alpha_x}{2(1+\alpha_x)}(p_x+\sigma_x)-\sigma_x\right\}^2 + (\sigma_x - p_x)^2\right] +$$

$$+\alpha_x\left[p_x + \frac{1-2\alpha_x}{2(1+\alpha_x)}(p_x+\sigma_x)+\sigma_x\right]^2 = \beta_x\sigma_{sx}^2. \tag{11}$$

После упрощений и преобразований условие пластичности для пористых материалов для плоского напряженного состояния будет иметь вид [7]:

$$p_x^2 - 2\frac{1-2\alpha_x}{1+4\alpha_x}p_x\sigma_x + \sigma_x^2 = \frac{4}{3}\frac{1+\alpha_x}{1+4\alpha_x}\beta_x\sigma_{sx}^2. \tag{12}$$

Для определения величины относительной плотности γ_x воспользуемся основными уравнениями теории течения пористых материалов, а именно зависимостями между главными напряжениями σ_1, σ_2, σ_3 и главными скоростями $\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2, \dot{\varepsilon}_3$ пластической деформации [3]:

$$\dot{\varepsilon}_1 = 3\lambda\left[\sigma_1 - (1-2\alpha)\frac{\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3}{3}\right], \quad \dot{\varepsilon}_2 = 3\lambda\left[\sigma_2 - (1-2\alpha)\frac{\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3}{3}\right],$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = 3\lambda\left[\sigma_3 - (1-2\alpha)\frac{\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3}{3}\right], \tag{13}$$

где λ – множитель Логранжа.

Учитывая равенство отношений главных деформаций и главных скоростей деформаций, преобразовываем выражения к следующему виду [3]:

$$\frac{\dot{\varepsilon}_1}{\dot{\varepsilon}_3} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} = \frac{\sigma_1 - (1-2\alpha)(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3}{\sigma_3 - (1-2\alpha)(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3}. \tag{14}$$

В силу предположения о плоском деформированном состоянии будут иметь силу соотношения $\varepsilon_1 = \varepsilon_h; \varepsilon_2 = 0; \varepsilon_3 = \varepsilon_x$; $\sigma_3 = \sigma_x; \sigma_1 = p_x$; $\sigma_2 = (1-2\alpha)(p_x + \sigma_x)/[2(1+\alpha)]$.

С учетом этого соотношение главных деформаций [8]:

$$\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_x} = \frac{p_x(1+4\alpha_x) - \sigma_x(1-2\alpha_x)}{\sigma_x(1+4\alpha_x) - p_x(1-2\alpha_x)}. \tag{15}$$

Переходя к параметрам напряженно-деформированного состояния выделенного элементарного объема, получим:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x(1+4\alpha_x) - p_x(1-2\alpha_x)}{p_x(1+4\alpha_x) - \sigma_x(1-2\alpha_x)}\frac{h_{x1} - h_{x2}}{h_{x1}}, \tag{16}$$

где h_{x1}, h_{x2} – толщины полосы на входе и выходе из элементарного объема очага деформации.

С учетом закон сохранения массы, выражение для относительной плотности записывается следующим образом [7]:

$$\gamma_{x2} = \gamma_{x1}\frac{h_{x1}}{h_{x2}(1+\varepsilon_x)}. \tag{17}$$

В случае волочения или прокатки в круглых калибрах порошковой проволоки, то есть в случае осесимметричного напряженного состояния, главные напряжения в уравнении (1) равны [8] $\sigma_1 = \sigma_x$; $\sigma_2 = \sigma_3 = p_x$. Подставив эти данные в уравнение (1), получим:

$$f = \frac{1}{2}\left[(\sigma_x - p_x)^2 + (p_x - \sigma_x)^2\right] + \alpha_x(\sigma_x + 2p_x)^2 - \beta_x\sigma_{sx}^2 = 0. \tag{18}$$

Проведя математические преобразования, получим:

$$\frac{1}{2}\left[\sigma_x^2 - 2\sigma_x p_x + p_x^2 + p_x^2 - 2p_x\sigma_x + \sigma_x^2\right] + \alpha_x\sigma_x^2 + 4p_x\sigma_x\alpha_x + 4p_x^2\alpha_x - \beta_x\sigma_{sx}^2 = 0;$$

$$\sigma_x^2 + p_x^2 - 2\sigma_x p_x + \alpha_x\sigma_x^2 + 4\alpha_x p_x^2 + 4\alpha_x p_x\sigma_x - \beta_x\sigma_{sx}^2 = 0;$$

$$\sigma_x^2(1+\alpha_x) + p_x^2(1+4\alpha_x) - 2\sigma_x p_x(1-4\alpha_x) - \beta_x\sigma_{sx}^2 = 0;$$

$$\sigma_x^2 - 2\sigma_x p_x\frac{1-4\alpha_x}{1+\alpha_x} + p_x^2\frac{1+4\alpha_x}{1+\alpha_x} = \frac{1}{(1+\alpha_x)}\beta_x\sigma_{sx}^2. \tag{19}$$

Воспользовавшись зависимостями между главными скоростями пластической деформации и главными напряжениями, предоставляемыми теорией течения пористых материалов [3], соотношение скоростей, а вместе с этим и соотношение показателей соответствующих деформаций $\varepsilon_1 / \varepsilon_3$ может быть определено как:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} = \frac{\sigma_1 - (1-2\alpha)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3}{\sigma_3 - (1-2\alpha)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3}, \tag{20}$$

где, учитывая то, что применительно к рассматриваемой осесимметричной схеме нагружения в силу принятых допущений имеет место выполнение соотношений $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_{dx}$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_{Lx}$; $\sigma_2 = \sigma_3 = p_x$; $\sigma_1 = \sigma_x$, искомая величина соотношения показателей степени деформации $\varepsilon_L / \varepsilon_d$ может быть выражена зависимостью следующего вида:

$$\frac{\varepsilon_{Lx}}{\varepsilon_{dx}} = \frac{\sigma_x - (1-2\alpha_x)(2p_x + \sigma_{xi})/3}{p_x - (1-2\alpha_x)(2p_x + \sigma_x)/3}. \tag{21}$$

Соответственно показатель степени деформации ε_{Lx} будет равен [8]:

$$\varepsilon_{Lx} = 2\frac{\sigma_x(1+\alpha_x) - p_x(1-2\alpha_x)}{p_x(1+4\alpha_x) - \sigma_x(1-2\alpha_x)} \cdot \frac{F_{x1}}{F_{x1} - F_{x2}}, \tag{22}$$

где F_{x1}, F_{x2} – площади поперечного сечения проволоки на входе и выходе из элементарного объёма очага деформации.

С учётом чего результирующая в рамках каждого отдельного элементарного объёма относительная плотность порошкового материала будет соответствовать:

$$\gamma_{x2} = \gamma_{x1} F_{x1} / \left[F_{x2}(1+\varepsilon_{Lx})\right], \tag{23}$$

где γ_{x1}, γ_{x2} – относительная плотность порошкового материала на входе и выходе из элементарного объёма очага деформации.

Полученные зависимости легли в основу математических моделей процессов прокатки порошковых лент [7], плющения и волочения [9] порошковой проволоки. Для проверки их адекватности был проведен ряд экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования интегральных характеристик процесса прокатки были проведены для случая прокатки порошка бронзографита с насыпной толщиной 4,0 мм на металлической подложке из стали 08 кп толщиной 3,5 мм [7]. Ширина прокатываемой композиции для всех случаев составляла 175 мм. Эксперименты были проведены на промышленно-лабораторном стане 200 × 260. В ходе экспериментов изменяли конечную толщину прокатываемой композиции с 4,5 мм до 3,9 мм, то есть степень обжатия порошковой композиции варьировалась в диапазоне от 75 % до 90 %. Сравнения полученных экспериментальных зависимостей с расчетными показало, что доверительный интервал погрешности определения для силы прокатки составил 10,4 %.

Исследования интегральных энергосиловых параметров и результирующих геометрических характеристик процесса плющения ленты были проведены в рабочей клети 100 × 100. Непосредственно плющению подвергали предварительно сформованную порошковую проволоку исходным диаметром $d_0 = 2{,}6$ мм из стали 08 кп с порошковым сердечником, основой которого являлся железный порошок марки ПЖР-3 [9]. Собственно процесс плющения осуществляли с различными обжатиями до толщин 0,86; 0,95 и 1,06 мм в рабочей клети без использования технологической смазки. Сравнение полученных экспериментальных данных с теоретическими показало, что погрешность определения ширины полосы не превысила 7,58 %, а силы прокатки – 10,02 %.

Осесимметричная задача была апробирована при экспериментальном исследовании процесса волочения порошковой проволоки. В качестве оболочки использовали ленты: медную М1 толщиной 0,5 мм и шириной 15 мм, стальную 65Г толщиной 0,5 мм, шириной 12 мм.

Основным материалом в составе порошкового сердечника в медной оболочке составлял медный порошок марки ПМС-1, а в стальной оболочке – железный порошок марки ПЖР-3. В ходе эксперимента проволока подвергалась деформации за пять переходов при относительной деформации за переход от 0,143 до 0,157 для медной проволоки и от 0,085 до 0,149 для стальной, при этом относительная плотность медного порошка для меди составила порядка 0,7, а для железного – 0,8. Сила натяжения при волочении составила порядка 3 кН. Погрешность определения плотности порошкового сердечника не превысила 8,5 %, а для силы натяжения – 10 % [10].

ВЫВОДЫ

Сформулировано условие пластичности для случаев прокатки порошковых лент и волочения порошковой проволоки, позволяющее по относительно простой методике с использованием несложной оснастки, устанавливаемой в рабочей клети прокатного стана, описывать физико-механические свойства порошковых материалов различного состава. Данные условия пластичности легли в основу математических моделей процессов прокатки, плющения и волочения порошковых материалов. Экспериментальные исследования подтвердили правомерность использования данного условия пластичности и адекватность разработанного математического аппарата.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каташинский В. П. Напряженно-деформированное состояние прокатываемого порошка в зоне уплотнения / В. П. Каташинский, М. Б. Штерн // Порошковая металлургия. – 1983. – № 11. – С. 17–21.

2. Каташинский В. П. Напряженно-деформированное состояние прокатываемого порошка в зоне уплотнения / В. П. Каташинский, М. Б. Штерн // Порошковая металлургия. – 1983. – № 12. – С. 9–13.

3. 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.

4. Пат. 40142А Україна, МКВ В 22 F3/03. Установка для експериментального визначення фізико-механічних властивостей порошкових матеріалів / Потапкін В. Ф., Лаптєв О. М., Сатонін О. В. та ін. ; заявник та патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № 2000073921 ; заявл. 04.07.2000 ; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 6.

5. Пат. 59317 Україна, МПК (2006.01) В 22 F 3/03. Установка для експериментального визначення основних показників фізико-механічних властивостей порошкових матеріалів різноманітного складу / Сатонін О. В., Грибков Е. П., Іванов О. О., Косяков О. В. ; заявник та патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201012688 ; заявл. 26.10.2010 ; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9.

6. Грибков Е. П. Экспериментальный метод для определения физико-механических свойств порошка / Е. П. Грибков, Ю. А. Воробйов, В. Г. Попік // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 1999. – Вип. 5. – С. 226–228.

7. Напряженное состояние и кинематика при прокатке порошковых материалов на металлической подложке / В. Ф. Потапкін, О. М. Льовкін, О. В. Сатонин та ін. // Порошковая металлургия. – 2000. – № 1/2. – С. 13–21.

8. Investigation of the process of drawing flux-cored wire for welding copper to steel / V. V. Chigarev, P. A. Gavrish, E. P. Gribkov // Welding International Volume 26, Issue 9, 2012. – P. 718–722. – (DOI:10.1080/09507116.2011.653152).

9. Грибков Э. П. Изготовление порошковой плющенки для восстановительной наплавки / Э. П. Грибков, А. В. Шевченко // Вісник двигунобудування. – 2006. – № 4. – С. 13–15.

10. Экспериментальное исследование процесса волочения порошковой проволоки / А. Г. Гринь, Э. П. Грибков, А. В. Свиридов, И. А. Бойко // Розвиток методів розрахунку, удосконалення технологій та обладнання процесів обробки металів тиском : матеріали науково-технічної конференції. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 22.

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

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 05.03.2013 г.