

менению взаимодействия всех образующих молекулы частиц. Последующий после такого объединения молекул обмен энергиями между всеми их атомами после снятия механических нагрузок исключает энергетические особенности на границе соединяемых материалов (о таком обмене энергиями свидетельствует повышение температуры отформованного тела) и не приводит к разрушению установившихся связей. При нагреве соединяемых материалов до температур, меньших температур рекристаллизации, в процессе прессования у приграничных атомов потенциальная энергия взаимодействия уменьшится недостаточно, что исключит возможность их соединения [2].

Таким образом, приведенные представления о механизме соединения материалов позволяют не только с достаточной степенью достоверности объяснять процесс прессования, но и определять с минимальными затратами его наиболее оптимальные температуры прессования, выбираемые из интервалов температур рекристаллизации соединяемых материалов, и схемы формирования материалов покрытия и основы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Харченко В.В., Мрочек Ж.А. Получение пленочных покрытий прессованием // *Машиностроение*. – Мн. 2007. – Вып. 22. С. 34–37.
2. Харченко В.В., Тюрин Л.Н., Макушок Е.М. и др. Некоторые закономерности процесса нанесения радиальным обжатием покрытия на прессуемый профиль // *Весті АН Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. Навук*. 1994. №2. С. 43–47.
3. Семенов А.П. Трение и адгезионное взаимодействие тугоплавких материалов при высоких температурах. – М.: Наука, 1972. –160 с.
4. Макушок Е.М., Харченко В.В. Некоторые особенности металлической структуры и механизмы ее разрушения и соединения при тепловом и механическом воздействии // *ИФЖ*. 2002. Т.75. №1. С. 148–155.
5. Макушок Е.М., Харченко В.В. О моделях молекулы, их значении в развитии представлений об электропроводности и создании технологий снижения сопротивления материалов // *Теория и практика машиностроения*. 2003. №2. С. 17–20.
6. Мотт Н., Месси Г. Теория атомных столкновений. – М.: Мир, 1969. –756 с.
7. Точицкий Э.И. Кристаллизация и термообработка тонких пленок. – Мн.: Наука и техника, 1976. –314 с.

УДК 621.79

*Беляева Г.И., Беляев Г.Я., Крушевский А.Е., Присевок А. Ф.*

## К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ О СВОДООБРАЗОВАНИИ В ПИТАТЕЛЕ ПЛАЗМОТРОНА

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

При газопламенном и плазменном напылении порошковых материалов, особенно с малыми значениями удельного веса (порошки на основе пластических материалов и др.), часто наблюдаются случаи прекращения подачи порошка из питателя. Это объясняется тем, что в питателе образуется, несмотря на наличие избыточного давления, купол из порошка, который и держит на себе всю массу порошковой смеси. В связи с этим представляется важным найти математические зависимости, связывающие размерные характеристики формы питателя, физико-механические свойства порошков и параметры процесса напыления.

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СВОДООБРАЗОВАНИИ

Поставленная задача может быть решена как плоская, решение которой было нами приведено ранее [1], так и в пространственном отображении как осесимметричная задача.

### ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ ЗАДАЧА

Напишем дифференциальные уравнения равновесия сыпучей среды в сферических координатах:

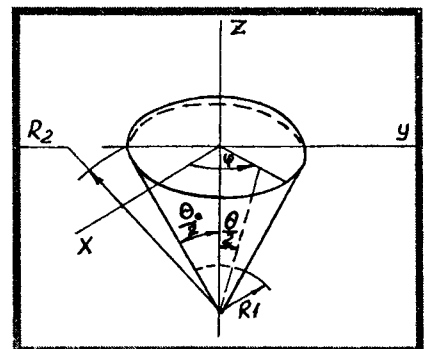


Рисунок 1 -- К решению задачи о сводообразовании

$$\frac{\partial \sigma_R}{\partial R} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{R} (2\sigma_R - \sigma_\theta - \sigma_\varphi + \tau_{r\theta} \cdot \operatorname{ctg} \theta) = g \cdot \cos \theta$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial R} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R} [3\tau_{r\theta} + (\sigma_\theta - \sigma_\varphi) \cdot \operatorname{ctg} \theta] = -\gamma \sin \theta,$$

где  $\sigma_R$ ,  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_\varphi$  - соответствующие нормальные напряжения;  $\tau_{r\theta}$  - касательные напряжения;  $g$  - удельный вес среды.

Если в плоской задаче вес сыпучей среды учитывался только в радиальном направлении, что приближенно справедливо для малых углов воронки (это в основном и ограничивает применение плоской задачи), то здесь учитывается произвольный угол раствора конуса  $\theta_0$ .

Так как,  $\sigma_R = -p$ , где  $p$  - радиальное давление внутри порошка, то можно предположить, что  $\sigma_\theta = -\lambda_1 \cdot p$ , а  $\sigma_\varphi = -\lambda_2 \cdot p$ . В результате получаем следующие два уравнения для нахождения  $p$  и  $\tau = \tau_{R\theta}$ :

$$-\frac{\partial p}{\partial R} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial \theta} + \frac{1}{R} \cdot (-2p + \lambda_1 \cdot p + \lambda_2 \cdot p + r \cdot \operatorname{ctg} \theta) = \gamma \cdot \cos \theta \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial R} - \frac{\lambda_1}{R} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial \theta} + \frac{1}{R} \cdot [3\tau - (\lambda_1 - \lambda_2) \cdot p \cdot \operatorname{ctg} \theta] = -\gamma \cdot \sin \theta \quad (2)$$

Учитывая, что  $\tau = 0$  при  $\theta = 0$ , полагаем, что  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ , т.е., равновесие возможно, если коэффициенты бокового распора  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  равны между собой.

Умножим уравнение (1) на  $R^4$  и продифференцируем его по  $R$ , а уравнение (2) - на  $\sin \theta$  и продифференцируем по  $\theta$ .

$$\frac{\partial^2 (R^3 \cdot \tau \cdot \sin \theta)}{\partial R \cdot \partial \theta \cdot \sin \theta} - \frac{\partial \left[ R^4 \frac{\partial \tau}{\partial R} + 2R^3(1 - \lambda)p \right]}{\partial R} - 4\gamma \cdot R^3 \cos \theta = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 (R^3 \cdot r \cdot \sin \theta)}{\partial \theta \cdot \partial R \cdot \sin \theta} - \frac{\lambda \cdot R^2}{\sin \theta} \cdot \frac{\partial \left( \sin \theta \cdot \frac{\partial p}{\partial \theta} \right)}{\partial \theta} + 2\gamma \cdot R^3 \cdot \cos \theta = 0 \quad (4)$$

В результате вычитания одного уравнения из другого получим разрешающее уравнение относительно  $p$ .

$$\frac{\partial}{\partial R} \left[ R^4 \frac{\partial p}{\partial R} + 2R^3(1 - \lambda)p \right] - \frac{\lambda \cdot R^2}{\sin \theta} \cdot \frac{\partial \left( \sin \theta \cdot \frac{\partial p}{\partial \theta} \right)}{\partial \theta} + 6\gamma \cdot R^3 \cdot \cos \theta = 0 \quad (5)$$

или:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial R^2} + \frac{2(3 - \lambda)}{R} \cdot \frac{\partial p}{\partial R} + \frac{6(1 - \lambda) \cdot p}{R^2} - \frac{\lambda}{R^2 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial \left( \sin \theta \cdot \frac{\partial p}{\partial \theta} \right)}{\partial \theta} + \cos \frac{6\gamma}{R} = 0 \quad (6)$$

Частное решение данного уравнения будет выглядеть в следующем виде:

$$p = A \cdot R \cdot \cos \theta; \quad [2(3 - \lambda) + 6(1 - \lambda) + 2\lambda] \cdot A = -6\gamma; \quad A = -\frac{\gamma}{2 - \lambda}$$

Тогда

$$p^* = -\frac{\gamma}{2 - \lambda} \cdot R \cdot \cos \theta; \quad \bar{p} = f_1(R)f_2(\theta)$$

$$\frac{\partial^2 f_1}{\partial R^2} \cdot f_2 + \frac{2(3 - \lambda)}{R} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial R} \cdot f_2 + \frac{6(1 - \lambda)}{R^2} \cdot f_1 \cdot f_2 - \frac{\lambda}{R^2 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial \left( \sin \theta \cdot \frac{\partial f_2}{\partial \theta} \right)}{\partial \theta} \cdot f_1 = 0 \quad (7)$$

$$\frac{R^2}{f_1} \cdot \frac{\partial^2 f_1}{\partial R^2} + \frac{2(3-\lambda) \cdot R}{f_1} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial R} + 6(1-\lambda) = \frac{\lambda}{R^2 \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \cdot \frac{\partial f_2}{\partial \theta} \right) = -k^2 \quad (8)$$

$$R^2 \cdot \frac{\partial^2 f_1}{\partial R^2} + 2 \cdot (3-\lambda) \cdot R \cdot \frac{\partial f_1}{\partial R} + 6(1-\lambda) \cdot f_1 + k^2 \cdot f_1 = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 f_2}{\partial \theta^2} + \operatorname{ctg} \theta \cdot \frac{\partial f_2}{\partial \theta} + \frac{R^2 \cdot f_2}{\lambda} = 0$$

$$f_1 = C \cdot R^\alpha; \quad \frac{\partial f_1}{\partial R} = C \cdot \alpha \cdot R^{\alpha-1}; \quad \frac{\partial^2 f_1}{\partial R^2} = C \cdot \alpha \cdot (\alpha-1) \cdot R^{\alpha-2}$$

$$\alpha(\alpha-1) + 2(3-\lambda) \cdot \alpha + 6(1-\lambda) + k^2 = 0 \quad (10)$$

$$\alpha_{1,2} = \frac{5-2\lambda}{2} \pm \sqrt{\left[ (1-2\lambda)^2 + 8\lambda - 4k^2 \right]}; \quad f_1 = C_1 \cdot R^{\alpha_1} + C_2 \cdot R^{\alpha_2}$$

$$f_2 = B \cdot \cos \theta; \quad B \cdot \cos \theta - \operatorname{ctg} \theta \cdot B \cdot \sin \theta + \frac{k^2 \cdot B \cdot \cos \theta}{\lambda} = 0;$$

$$\alpha_1 = -2; \quad \alpha_2 = -3+2\lambda; \quad k_2 = 2\lambda$$

Тогда

$$p = (C_1 \cdot R^{-2} + C_2 \cdot R^{-3+2\lambda}) \cdot \cos \theta - \frac{\gamma \cdot R}{2-\lambda} \cdot \cos \theta \quad (11)$$

$$\tau = -\lambda \cdot (C_1 \cdot R^{-2} + C_2 \cdot R^{-3+2\lambda}) \cdot \sin \theta - \frac{\gamma(1-\lambda)}{4(2-\lambda)} \cdot R \cdot \sin \theta \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} C_1 \cdot R_1^{-2} + C_2 \cdot R_1^{-3+2\lambda} - \frac{\gamma \cdot R_1}{2-\lambda} &= 0 \\ C_1 \cdot R_2^{-2} + C_2 \cdot R_2^{-3+2\lambda} - \frac{\gamma \cdot R_2}{2-\lambda} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$C_1 \cdot R_2^2 + C_2 \cdot R_2^{-3+\lambda} - \frac{\gamma \cdot R_2}{2-\lambda} = A \quad (14)$$

$$C_1 = \frac{\gamma \cdot R_1^3}{2-\lambda} - \frac{R_1^{-1+2\lambda}}{R_2^{-1+2\lambda} - R_1^{-1+2\lambda}} \cdot \left[ \frac{\gamma \cdot (R_2^3 - R_1^3)}{2-\lambda} + A_0 \cdot R_2^2 \right] \quad (15)$$

$$C_2 = \frac{1}{R_2^{-1+2\lambda} - R_1^{-1+2\lambda}} \cdot \left[ \frac{\gamma \cdot (R_2^3 - R_1^3)}{2-\lambda} + A_0 \cdot R_2^2 \right] \quad (16)$$

$$\tau_0 = \tau + f \cdot p$$

$$\begin{aligned} -\lambda \cdot (C_1 \cdot R^{-2} + C_2 \cdot R^{-3+2\lambda}) \cdot \sin \theta - \frac{\gamma \cdot (1-\lambda)}{4(2-\lambda)} \cdot R \cdot \sin \theta &= \tau_0 + \\ + f \left[ (C_1 \cdot R^{-2} + C_2 \cdot R^{-3+\lambda}) \cdot \cos \theta - \frac{\gamma \cdot R \cdot \cos \theta}{2-\lambda} \right] & \end{aligned} \quad (17)$$

Из приведенных соотношений всегда можно определить параметры питателя, обеспечивающие бесперебойную подачу порошковой массы без сводообразования.

#### Выводы

Полученные при решении плоской задачи зависимости размерных параметров питателя от физико-механических свойств порошковой массы и избыточного давления внутри питателя вполне пригодны для определения размеров питателя с малыми углами воронки. Зависимости, полученные при решении пространственной осесимметричной задачи пригодны для определения параметров питателя с любым углом раствора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беляева Г.И., Беляев Г.Я., Крушевский Е.А., Присевок А.Ф. Расчет формы питателя плазмотрона //Машиностроение. – Мн., 2007 – Вып. 23 2. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение

покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. – М.: Metallurgy, 1992. – 429 с. 3. Г. Корн, Е. Корн. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1978. – 832 с. с илл.

### **The determination of the rational form of a feeder**

When powdered mixes are sprayed with gas – flame, especially with low value of relative density (powders on plastic material base and enc.) often there are cases of powder supply termination from the feeder. This is caused by the fact of the powder dome formation in the feeder, even if pressure is excessive, which holds the entire powder mix mass.

That is why it is important to find mathematical dependencies which connect the feeder form characteristics, physical and mechanical properties of powders and parameters of spraying process.

УДК 621.791.(035.5)

*Спиридонов Н.В., Кураш В.В., Кудина А.В.*

## **УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКОМ**

*. «Белорусский национальный технический университет», . Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»  
Минск, Республика Беларусь*

Важным элементом повышения качества наплавленной поверхности является измельчение структуры металла. Это достигается подачей ультразвука на плавящийся электрод. Приводится схема устройства и его описание для легирования металлоповерхностей электродуговой наплавкой с металлорошковой присадкой и подачей ультразвука на плавящийся электрод.

При электродуговой наплавке сплошным проволочным электродом с порошковой присадкой, химический состав наплавленного металла определяется концентрацией легирующих элементов в основе, электродной проволоке и порошковой присадке. В композиционном слое металл основы и металл проволоки образуют матричный сплав, в который вплавлены твердосплавные частицы присадки. При наплавке гомогенного покрытия все три составные части перемешиваются, образуя монолитный слой /1/.

Обработка жидкого металла порошками и металлическими добавками, обеспечивающая создание развитой контактной поверхности расширяющих фаз, активизирует реакции на границе твердая фаза – жидкость, ускоряет диффузионные процессы, интенсифицирует раскисление и легирование металла. Использование металлорошковых смесей для активирования электродуговой наплавки и интенсификации процессов легирования имеет ряд особенностей. Объем жидкого металла в сварочной ванне, как правило, не превышает 1-2 см<sup>3</sup>, а его масса – 10 г. Из-за этого практически невозможна продувка газопорошковой смеси через расплав, и единственным реальным методом подачи порошковой присадки является ее введение на поверхность сварочной ванны. Для создания высоколегированных покрытий и максимального уменьшения тепловложения необходимо вводить значительный объем порошка (относительно объема жидкого металла) в короткий промежуток времени. Важным условием является тщательный подбор скорости газопорошковой смеси. Это связано с тем, что высокоскоростная струя может нарушить формирование наружной поверхности покрытия, вызвать седлообразность наплавливаемых валиков, наплывы, выплескивание жидкого металла из ванны. Струя с малой скоростью не обеспечивает проникновения частиц с небольшой плотностью на необходимую глубину, а это приводит к неравномерности легирования покрытия по высоте.

Размеры зоны ввода порошка не должны превышать размеров зеркала сварочной ванны. В противном случае возрастают потери дорогостоящего порошкового материала. Присадку целесообразно подавать в ванну, имеющую оптимальную температуру, где конвективные потоки обеспечивают равномерное легирование наплавленного металла.

При нанесении износостойких слоев, состоящих из твердых частиц, распределенных в более мягкой матрице, особое внимание следует уделять материалу матричного слоя. Он должен иметь высокую прочность, хорошо удерживать частицы присадки в покрытии, препятствовать