

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Р.А. Москалец, А.С. Ковчур, В.К. Шелег

УДК 539.3:621.726/УДК 620.179.112

### РЕФЕРАТ

*ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ, ЖИДКОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ СМАЗКИ, ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПЛАСТИФИКАТОР, КОЭФФИЦИЕНТ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ*

*В представленной статье с использованием структурной модели неупругого деформирования порошковых материалов описан процесс уплотнения порошковых материалов в замкнутом объеме, уточнено условие пластичности с точки зрения жидкодинамической теории смазки. На основании этого в статье проведен ряд теоретических исследований по обоснованию выбора пластификатора, используемого при подготовке технологических смесей порошковых материалов. Результаты статьи могут быть использованы при экспериментальных исследованиях процессов формования порошковых материалов и проектировании оснастки.*

### ABSTRACT

*PLASTIC DEFORMATION, POWDER MATERIALS, SOFTENER, FACTOR OF AN INTERNAL FRICTION, CONTACT FRICTION IN PROCESSES OF PROCESSING OF METALS BY PRESSURE, LIQUID DYNAMICS GREASING THEORIES*

*The theoretical substantiation of structural model which describes not elastic deformation of powder materials is determined in the paper. The condition of plasticity and with uses the liquid dynamics greasing theories and friction is specified. The processes of consolidation of a powder material are described in the article. The results of the investigation can be used in the experimental researches of the formation processes of a powder material, for the optimization of softener choice and for equipment designing.*

Целью данной статьи является поиск и теоретическое обоснование условий пластичности порошковых материалов. Соответственно ставится и решается следующая задача: используя теоретическое обоснование структурной модели неупругого деформирования порошковых материалов уточнить на ее основе условие пластичности с использованием жидкодинамической теории смазки, описывающее процесс уплотнения порошковых материалов в замкнутом объеме, и формирование предпосылок для оптимального выбора пластификатора.

В общем случае любые реально протекающие процессы включают в себя бесконечно много геометрических особенностей, свойств материала, характера внешних нагрузжений и т. п. В практических расчетах учесть абсолютно все особенности рассматриваемого объекта, которые как-либо влияют на его поведение, при ограниченной мощности вычислительных средств невозможно, а самое главное, и не нужно. Поэтому мы заменили объект одной из множества име-

ющихся сегодня физических моделей. Выбирая модель, мы исходили из того, что она должна обладать конечным числом особенностей из числа тех, которые присущи исходному объекту. При этом некоторые из свойств объекта при переносе на эту модель могли подвергаться ряду каких либо изменений, которые, оказывая незначительные влияния на интересующие нас стороны поведения исследуемого объекта, смогли бы существенно упростить его теоретически-модельное представление, а значит, упростить и само исследование.

Необходимым условием получения беспористых изделий является способность материала к пластическому деформированию. Соответственно общее условие пластичности для порошковых материалов можно записать как

$$\frac{\sigma^2}{2 \cdot \psi} + \frac{T^2}{\varphi} = \rho \cdot \tau_0^2,$$

где  $\sigma$  – среднее напряжение;  $T$  – интенсивность

касательных напряжений сдвига;  $\tau_0$  – предел текучести на сдвиг вещества твердой фазы;  $\psi, \varphi$  – функции относительной плотности  $\rho$ .

Это условие описывает механическое поведение несплошных тел, которые деформируются во время пластического сдвига твердой фазы. В этом случае предел текучести порошковых материалов в твердой фазе  $\tau_s$  не зависит от такой величины, как  $\sigma$  (среднее напряжение) [1, 2].

Нужно напомнить, что порошковый материал представляет собой некоторую совокупность частиц, способных пластически деформироваться как за счет пластического сдвига этой совокупности частиц, так и за счет скольжения относительно друг друга этой же совокупности контактирующих частиц. Поэтому для порошкового тела будем рассматривать два предела текучести: это трения скольжения  $\tau_{ск}$  и сдвиг  $\tau_s$ . Предел текучести скольжения  $\tau_{ск}$  зависит от величины среднего напряжения  $\sigma$ , эту зависимость примем в форме закона трения Кулона:

$$\tau_{ск} = K_0 - f\sigma, \quad (1)$$

где  $K_0$  – константа сдвигового сцепления;  $f$  – коэффициент внутреннего трения. С ростом сжимающего среднего напряжения  $\sigma$  величина  $\tau_{ск}$  стремится к своему предельному значению  $\tau_0$ , равному пределу текучести сдвига  $\tau_s$  для пластичных частиц или пределу сдвиговой прочности  $\tau_b$  для хрупких частиц.

Но для частиц, приближенных к сферической форме и одинакового диаметра, даже при самом плотном размещении невозможно освободиться от образования пор. Уменьшение количества пор можно добиться введением второй фракции частиц, имеющих меньшие размеры, которые могут разместиться в пустотах между более крупными частицами и заполнить места, где потенциально могут образоваться поры. При использовании этого условия тело можно принять как приближенное к гипотетически беспористому. И соответственно условие пластичности гипотетического беспористого тела определим как условно-гладкое и запишем в виде

$$T = K_0 - f\sigma \text{ при } \sigma \leq \sigma^*; T = \tau_0 \text{ при } \sigma > \sigma^*, \quad (2)$$

где  $\sigma^*$  – среднее напряжение, при котором наступает пластическая деформация или разрушение частиц,  $\sigma^* = (K_0 - \tau_0)/f$ . Условно-гладким будет и условие пластичности для гипотетического пористого тела, которое найдем при предельном переходе из упругой области в пластическую область с использованием гипотезы Бельтрами. В работах [3, 4] при предельном переходе получено следующее условие пластичности:

$$\frac{\sigma^2}{2 \cdot \psi} + \frac{T^2}{f} = \rho(K_0 - f\sigma)^2 \text{ при } \sigma \leq \sigma^*, \quad (3)$$

$$\frac{\sigma^2}{2 \cdot \psi} + \frac{T^2}{f} = \rho\tau_0^2 \text{ при } \sigma > \sigma^*. \quad (4)$$

Условие пластичности предполагает, что в таком предельном состоянии может находиться весь объем твердой фазы, количественной мерой которого может служить относительная плотность  $\rho$  в правой части уравнений (3, 4). Но для рассматриваемых порошковых тел желательно определить предельное состояние контактного объема. Тогда условие пластичности запишется в следующем виде:

$$\frac{\sigma^2}{2 \cdot \psi} + \frac{T^2}{f} = a(K_0 - f\sigma)^2 \text{ при } \sigma \leq \sigma^*, \quad (5)$$

где  $a$  – относительная доля контактного объема, зависящая от текущей относительной плотности порошка  $\rho$ . Это условие пластичности (5) впервые было предложено в работе [5].

При этом коэффициент внутреннего трения  $f$ , являющийся одной из составляющих общей теории пластичности порошковых материалов, на первоначальном этапе формования можно рассмотреть с точки зрения жидкодинамической теории смазки. Так как на этом этапе формования частиц порошка часто возникает такой эффект, как образование динамического свода при формовании (так называемый арочный эффект), в общем случае рекомендуется в состав смеси вводить пластификатор. Как указывается в монографии [6], на стадии уплотнения материала избежать образования арок довольно легко – частицы смещаются в свободное пространство под влиянием смазывающего действия введенного пластификатора. Далее рассматривая стадию формования, когда пластическое течение макси-

мально, уже необходимо, чтобы пластификатор занимал все межчастичное пространство. В этом случае введенный пластификатор будет рассекать каждую потенциально возникающую арку хотя бы в одном месте. Эти соображения были учтены при выводе соотношения (1:4) в монографии [6], которое позволяет рассчитать количество пластификатора, нужное для непрерывного формования материала или прессования фасонных изделий. Если в материале пластификатора меньше рекомендуемого количества, то при его уплотнении опять же может возникнуть арочный эффект; и продолжение формования невозможно без пластической деформации частиц, что приводит к резкому увеличению нужного давления прессования. Возникновение этого нежелательного эффекта и обуславливает использование пластификаторов при формовке порошковых изделий.

Но здесь мы опять вернемся к коэффициенту внутреннего трения  $f$  и рассмотрим возникающие при прессовке процессы трения частиц порошка между собой и о стенки матрицы пресс-формы в режиме гидродинамической смазки. Вначале предположим, что течение пластификатора подчиняется закону Куэтта. Это предельный случай, соответствующий легко нагруженной прессовке. Этим предположений достаточно для расчета силы трения (напомним, что они непригодны для оценки общей нагрузки), при таком решении задачи можно воспользоваться общими уравнениями гидродинамики. В этом случае мы ограничиваемся рассмотрением элементарных случаев. Пусть матрица неподвижна, а заготовка сжимается с некоторой скоростью  $V$  при помощи пуансона. Если между частицами порошка и стенки матрицы пресс-формы состояние пластификатора можно описать ламинарным течением Куэтта, то распределение скорости по толщине смазочной пленки постоянной толщины  $c$  (здесь  $c$  – зазор) является линейным. В этом случае градиент скорости равен  $V/c$ , и согласно определению вязкости, сопротивлению трению на единицу площади равен:

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{V}{c},$$

где  $A$  – площадь опорной поверхности. Соответственно полная сила трения равна:

$$F = \eta \frac{VA}{c}.$$

Коэффициент трения определяется, как обычно, делением силы трения на нагрузку  $W$ . Принимая во внимание, что площадь опорной поверхности равна  $A = \pi R^2$ , можно найти, что  $f = 2\pi\eta \cdot VR^2/Wc$ . Обычно используется удельная нагрузка на формирующий пуансон, определяемая как нагрузка на единицу площади проекции вала  $H = W/(2RL)$ . Тогда коэффициент трения можно выразить как

$$f = \pi \frac{\eta V^2}{P} \frac{R}{c}. \quad (6)$$

Безразмерный комплекс  $\eta V/P$  с некоторой натяжкой можно назвать числом Гумбеля, то есть значение коэффициента трения может быть представлено прямой линией. Другими словами, уравнение (6) показывает, что коэффициент трения прямо пропорционален вязкости  $\eta$  и скорости перемещения  $V$ , и обратно пропорционален нагрузке возникающей при прессовании  $P$ , что видно из рисунка 1.

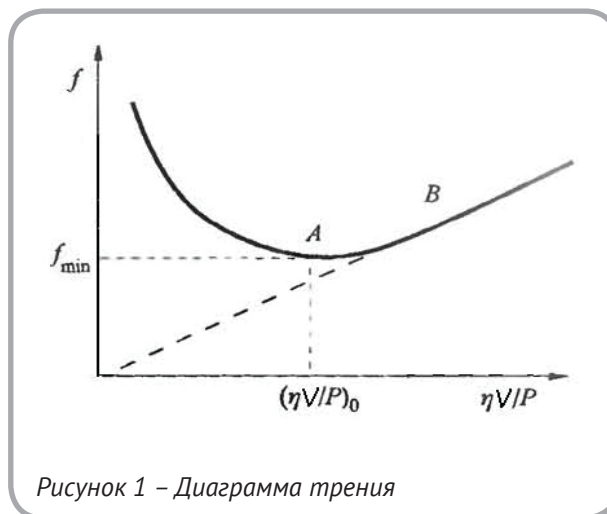


Рисунок 1 – Диаграмма трения

На первый взгляд кажется разумным использовать смазку с наименьшей вязкостью (в общем случае с наименьшим числом Гумбеля) для снижения трения. Но в нашем случае, на финишной стадии формования при снижении вязкости возрастает эксцентриситет, и минимальный зазор между поверхностями уменьшается.

Наличие наиболее высоких неровностей поверхностей частиц порошка приводит к их вза-

имодействию, и происходит изменение механизма трения. Начиная от точки **B** зависимость *f* отклоняется от прямой линии графика и при определенном значении числа Гумбеля  $(\eta V/P)_0$  достигает своего минимума. Далее при увеличении нагрузки (на рис. 1 этот отрезок расположен левее точки **A**), в которой достигается минимум коэффициент трения возрастает вследствие перехода от гидродинамической и смешанной смазки к граничной смазке, и в конечном счете к сухому трению. Один из основных практических выводов из предложенной нами теории гидродинамической смазки заключается в том, что существует критическое значение  $(\eta V/P)_0$ , обеспечивающее минимальное трение. Внешняя нагрузка **P** и скорость **V** обычно выбираются в соответствии с предъявляемыми требованиями, и проблема заключается только в выборе наилучшего пластификатора [7]. Оптимальная вязкость определяется соотношением

$$\eta = \left(\frac{\eta V}{P}\right)_0 \frac{P}{V}.$$

Но в нашем случае вязкость пластификатора зависит и от прилагаемого давления. Эту зависимость можно выразить эмпирической формулой

$$\eta = \eta_a \exp(\alpha p),$$

где  $\eta_a$  – динамическая вязкость при атмосферном давлении,  $\alpha$  – пьезокоэффициент вязкости.

Далее процесс прессования изделий из порошка, смешанного с пластификатором можно рассматривать с точки зрения точечного или линейного контактов (рис.1). В этом случае могут возникнуть условия, при которых трение и толщина пластификатора между двумя частицами, находящимися в относительном движении, определяются не только вязкостью смазки, но и упругими свойствами тел.

Однако с физической точки зрения это не совсем так. Между атомами и молекулами двух сближающихся поверхностей действуют силы притяжения и отталкивания, которые уравнивают друг друга на некотором равновесном расстоянии  $z_0$ . При расстоянии между поверхностями  $z < z_0$  они отталкиваются, а при  $z > z_0$  притягиваются. В этом случае силы притяжения и отталкивания описываются таким соотношением:

$$P(z) = \frac{8\gamma}{3z_0} \left[ \left(\frac{z_0}{z}\right)^3 - \left(\frac{z_0}{z}\right)^3 \right]. \quad (7)$$

Силы притяжения также действуют вне контактного круга, прижимая контактирующие тела друг к другу. Известно, что профиль деформированной сферы за пределами контактного круга описывается уравнением

$$z(r, a) = [a(r^2 - a^2)^{1/2} - (2a^2 - r^2) \arctg(r^2/a^2 - 1)^{1/2}],$$

к которому следует добавить равновесное расстояние  $z_0$ . Тогда силу молекулярного притяжения можно рассчитать, используя следующую зависимость [7]:

$$F = 2\pi \int_a^\infty p(z + z_0) r dr,$$

где функция *p* и ее аргумент *z* задаются соответственно соотношением (7) и уравнением профиля деформированной сферы.

Равновесие достигается, когда деформация такова, что упругая реакция (сила упругого восстановления сферы)  $F_e$  уравнивает совместное действие приложенной внешней нагрузки **P** и сил молекулярного притяжения **F**:

$$F_e = P + F.$$

При этом вводимый при подготовке порошковых материалов пластификатор, исходя из предложенной модели, должен обладать слабыми сцепляющими с частицами порошкового материала свойствами, это свойство пластификатора позволит уменьшить прилагаемую к заготовке нагрузку для возникновения силы молекулярного притяжения **F**. Сформированный таким образом контакт, называемый фактическим, по своей площади будет значительно меньше, чем номинально описанный здесь контакт.

Экспериментальные исследования, приведенных нами физических процессов, протекающих на разных стадиях формования порошковых материалов позволяют сделать следующие выводы.

Использование пластификаторов на первоначальном этапе формования изделий из порошковых материалов дает возможность исключить возникновение арочного эффекта, который негативно сказывается на формировании

заготовок и необоснованно повышает усилие по прессовке заготовок. Но на следующих этапах формования, как видно из предложенных здесь моделей, использование пластификатора нежелательно. И одним из путей решения этой проблемы может быть уменьшение шероховатости поверхности частиц прессуемого порошка, использование новых видов пластификаторов с ярко выраженными свойствами, описываемыми приведенной здесь гидродинамической моделью смазки. Также при обсуждении результатов статьи нами сделано предположение о том, что уменьшив шероховатость поверхности частиц

порошка, возможно обойтись без введения пластификатора. Для этого мы предлагаем использовать технологии поверхностно-пластического деформирования или химическое фрезерование.

Кроме того, использование предложенной нами жидкостной теории смазки совместно с моделью трения с упругим контактом с адгезией в практической деятельности заметно позволяет облегчить проектирование оснастки для деталей, изготавливаемых с помощью порошковых технологий.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Скороход В.В., Штерн М.Б., Мартынова И.Ф. (1987). Теория нелинейно-вязкого и пластического поведения пористых материалов. Порошковая металлургия (8), с. 23-30.
2. Штерн М.Б. (1992). Развитие теории прессования и пластического деформирования порошковых материалов. Порошковая металлургия, (9), с.12-24.
3. Бейгельзимер Я.Е., Германский А.П., Алистратов Л.И. (1986). Условие пластичности для порошков твердосплавных смесей. Порошковая металлургия, (12), с.11-15.
4. Балшин М.Ю. (1972). Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. М.Ю. Балшин – Москва: Металлургия], – 336 с.
5. Амосов А.П., Федотов А.Ф. (2000) Вариант условия пластичности порошковых материалов. Порошковая металлургия. (3-4), с. 4-10.
6. Шелег В.К., Ковчур А.С., Пятов В.В. (2004) Переработка гальваноотходов. Витебск : УО «ВГТУ», -185 с.
7. Мышкин Н.К. Петроковец М.И. (2007) Трение. Смазка. Износ. Физические основы и технические приложения трибологии Н.К. Мышкин и

#### REFERENCES

1. Skorohod, V.V., Shtern, M.B., Martynova, I.F. (1987), The theory of nolineary-viscous and plastic behaviour of porous materials. [Teoriya nelineyno-vyazkogo i plasticheskogo povedeniya poristyyih materialov]. Poroshkovaya metallurgiya – Powder metallurgy, (8), pp. 23-30.
2. Shtern, M.B. (1992), Development of the theory of pressing and plastic deformation of powder materials [Razvitie teorii pressovaniya i plasticheskogo deformirovaniya poroshkovyih materialov]. Poroshkovaya metallurgiya – Powder metallurgy, (9), pp.12-24.
3. Beygelzimer, Ya.E., Getmanskii, A.P., Alistratov, L.I. (1986), Condition of plasticity for powders firmlyfloatable mixes [Uslovie plastichnosti dlya poroshkov tverdosplavnyih smesey]. Poroshkovaya metallurgiya – Powder metallurgy, (12), pp.11-15.
4. Balshin, M.Yu. (1972), Scientific bases of powder metallurgy and fibre metallurgy. [Nauchnyie osnovyi poroshkovoy metallurgii i metallurgii volokna. M.Yu. Balshin – Moskva : Metallurgiya], – 336 p.
5. Amosov, A.P., Fedotov, A.F. (2000), Variant of a condition of plasticity of powder materials . [Variant usloviya plastichnosti poroshkovyih

др. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 368 с.

8. Ливанов А.Н. (1976) Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. А.Н. Ливанов [и др.]. – Москва : Metallurgiya, -416 с.

materialov], Poroshkovaya metallurgiya – Powder metallurgy. (3-4), pp. 4-10.

6. Sheleg, V.K., Kovchur, A.S., Pyatov, V.V. (2004), Processing of a galvanic waste [Pererabotka galvanootodov, Vitebsk : UO «VGTU»], 185 p.

7. Myishkin, N.K. Petrokovets, M.I. (2007), Friction, greasing, deterioration. physical bases and technical appendices tribology. [Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tehicheskie prilozheniya tribologii N.K. Myishkin i dr.- Moskva : FIZMATLIT], 368 p.

8. Livanov, A.N. (1976), Contact friction in processes of processing of metals by pressure. [Kontaktное трение v protsessah obrabotki metallov davleniem], Moskva: Metallurgiya, 416 p.

*Статья поступила в редакцию 06.01.2014 г.*