

УДК 541.64:532.5

УСЛОВИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОРОШКОВ ПРИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ

© 1995 г. Я. Е. Бейгельзимер*, В. А. Белошенко*, Э. В. Прут**

* Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина Национальной академии наук Украины
340114 Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

** Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук
117977 Москва, ул. Косыгина, 4

Поступила в редакцию 15.03.95 г.

Рассмотрена модель пластической деформации полимерных порошков при гидростатическом сжатии, учитывающая рост сил трения с увеличением давления. Получено условие пластичности, проанализированное в координатах плотность—давление для порошков фторопласта. Рассчитаны параметры процесса гидростатического сжатия.

Давление является важным технологическим параметром во многих процессах переработки порошкового полимерного сырья: прессовании [1], спекании [2], твердофазной экструзии или экструзии порошковой заготовки [2 - 5] и т.д. При этом величина давления, необходимого для получения изделий требуемого качества, устанавливается как правило эмпирически, что связано с отсутствием соответствующих моделей, пригодных для количественного описания указанных процессов. В результате усложняется отработка технологических режимов и их оптимизация. В отличие от полимеров для металлических порошков разработан ряд математических моделей, позволяющих рассчитывать параметры технологических процессов и характеристики получаемых изделий [6]. К сожалению, эти модели не вполне пригодны для полимерных материалов [7].

Существующие модели [6] предполагают, что с ростом давления прессования относительная плотность порошкового материала стремится к единице (под относительной плотностью ρ понимают отношение плотности порошкового к плотности монолитного материала). Эксперименты, проведенные с полимерными порошками, указывают на то, что с увеличением давления прессования относительная плотность образцов стремится к некоторому значению меньше единицы, характерному для данного полимера [8]. Причина этого состоит в различии механизмов уплотнения металлических и полимерных порошков. Процесс уплотнения металлических порошков включает два основных этапа. Первый связан с относительным смешением и разворотом отдельных частиц, приводящим к более плотной их укладке. Второй этап — с пластической деформацией этих частиц, затеканием их в свободное пространство.

Процесс уплотнения полимерных образцов также двустадийный. Первая стадия, как и у металлов, связана с относительным смешением и разворотом отдельных частиц. Вместе с тем для полимеров характерны значительные упругие деформации отдельных частиц, приводящие к росту площади контакта и, следовательно, возрастанию сил межчастичного трения с увеличением гидростатического давления.

Вторая стадия уплотнения обусловлена в основном большими упругими деформациями частиц, заполняющих имеющееся свободное пространство. После снятия внешнего давления полимерный материал разрыхляется вследствие обратимости упругих деформаций, и его плотность возвращается на уровень, достигнутый к концу первой стадии. Поэтому относительная плотность спрессованного полимерного порошка оказывается меньше единицы.

ТЕОРИЯ

Построим математическую модель полимерного порошкового материала, отражающую указанные выше эффекты. Согласно работе [6], в основе модели пластической деформации изотропного порошкового тела лежит условие пластичности

$$f(\sigma, \tau, \rho) = 0, \quad (1)$$

где f — функция нагружения; σ и τ — первый и второй инварианты тензора напряжений ($\sigma = -P$, где P — гидростатическое давление).

Физический смысл условия пластичности состоит в следующем. Если напряженное состояние порошкового материала таково, что $f(\sigma, \tau, \rho) < 0$, он деформируется упруго. Если же выполняется условие (1), то образец деформируется пластически,

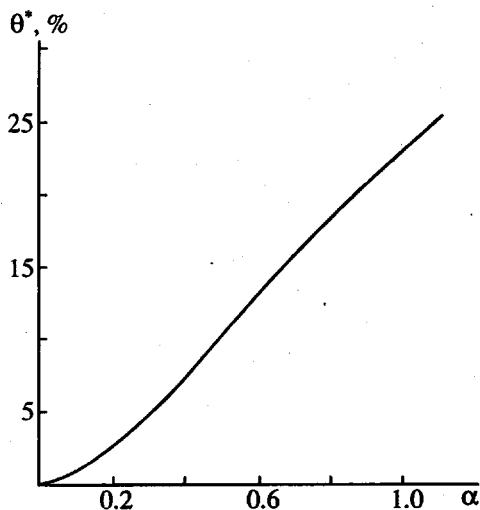


Рис. 1. Расчетная зависимость критической пористости θ^* от коэффициента внутреннего трения α .

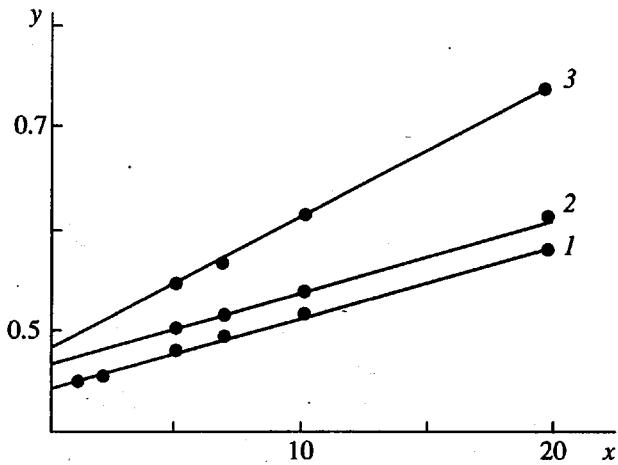


Рис. 2. Экспериментальные зависимости относительной плотности фторопластов марок Ф-4 (1), Ф-4МБ (2), Ф-2М (3) от величины гидростатического давления в координатах $y = 1 / \sqrt{\psi(\rho)}$, $x = (1/P) \times 10^3$, МПа⁻¹.

причем, как следует из соотношения (1), напряженное состояние не может быть произвольным. Оно оказывается взаимосвязанным с плотностью деформируемого материала. При этом уравнение (1) лишь частично отражает указанную взаимосвязь. Имеются и другие соотношения, совместно с выражением (1) составляющие полную систему уравнений. Интегрирование этой системы уравнений позволяет определить поля напряжений, деформаций и плотность материала [6, 7]. Остальные соотношения имеют либо вполне стандартный вид (уравнения равновесия), либо получаются из выражения для функции нагрузления на основе общепринятых предположений (соотношений между напряжениями и скоростью

деформации). Это свидетельствует об основополагающей роли условия пластичности в математической модели деформируемого материала.

Для металлических порошков условие пластичности имеет вид [6]

$$f = \frac{P^2}{\psi(\rho)} + \frac{\tau^2}{\phi(\rho)} - \rho K^2 = 0, \quad (2)$$

где

$$\psi(\rho) = \frac{2}{3} \frac{\rho^3}{1-\rho}, \quad \phi(\rho) = \rho^2, \quad (3)$$

K – интенсивность девиатора напряжений в каркасе материала, пропорциональная величине сил трения между частицами. Учтем в соотношении (2) отмеченное выше различие в механизмах уплотнения полимерных и металлических образцов. Так как в полимерных порошках силы межчастичного трения растут с увеличением давления, предположим, что

$$K = K_0 + \alpha P \quad (4)$$

(K_0 – коэффициент сцепления, α – коэффициент внутреннего трения). Подставляя формулу (4) в соотношение (2), получаем следующее условие пластичности для полимерных порошков:

$$f = \frac{P^2}{\psi(\rho)} + \frac{\tau^2}{\phi(\rho)} - \rho(K_0 + \alpha P)^2 = 0 \quad (5)$$

Если порошковый образец подвергается воздействию лишь гидростатического давления (т.е., когда $\tau = 0$), из уравнения (5) следует

$$P = \frac{K_0 \sqrt{\rho}}{\frac{1}{\sqrt{\psi(\rho)}} - \alpha \sqrt{\rho}} \quad (6)$$

Если ρ^* – корень уравнения

$$\frac{1}{\sqrt{\psi(\rho^*)}} = \alpha \sqrt{\rho^*}, \quad (7)$$

то $P \rightarrow \infty$ при $\rho \rightarrow \rho^*$. Это означает, что с ростом давления плотность порошкового материала при выполнении условия пластичности (5) стремится к величине $\rho^* < 1$.

На рис. 1 приведен график зависимости $\theta^* = 1 - \rho^*$ от α , полученный решением уравнения (7). Видно, что максимальное значение $\rho^* = 1$ имеют материалы с $\alpha = 0$ (металлические порошки).

Преобразуем соотношение (6) к виду

$$\frac{1}{\sqrt{\psi(\rho)}} = \frac{K_0}{P} + \alpha \quad (8)$$

Отсюда следует, что, согласно предлагаемой модели, зависимость плотность–давление при гид-