

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ФОРМОВАНИИ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА

Пятюв В.В., Ковчур А.С.

Для улучшения технологических свойств порошков в них часто вводят различные добавки: наполнители, порообразователи, пластификаторы, связующие вещества. Такие материалы используют при непрерывных методах формования, основанных на холодной экструзии (мундштучное и шнековое прессование), прокатке и при получении изделий сложной формы в прессформах.

Пластифицированный порошковый материал принципиально отличается от обычного тем, что состоит из двух существенно различающихся по своим свойствам составляющих: твердых и прочных частиц порошка и мягкого пластификатора (обычно органического происхождения). На сегодняшний день предприняты следующие попытки математического описания такого материала.

1. Гидродинамическая аналогия. Пластифицированный материал ассоциируется с очень вязкой жидкостью. Так как это явно не ньютоновская жидкость, то предлагаются различные реологические модели: от Бингама-Шведова до весьма сложных. Получено удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными лишь для материалов, содержащих растворы неорганических пластификаторов, например бентонитовой глины с водой. Исследование таких смесей представляет чисто теоретический интерес, так как столь жидкие прессовки не сохраняют форму. Эксперименты показывают, что реально формируемые материалы при перемещении по каналу постоянного сечения имеют практически плоский фронт; ни одна реологическая модель такого фронта не дает.

Хорошая теория должна оперировать коэффициентами, инвариантными к основным параметрам процесса деформации (давление, скорость перемещения, их производные и т.д.). Это позволяет проводить различные математические операции (интегрирование, дифференцирование...) с достаточной степенью общности. Для традиционных жидкостей таким коэффициентом в известных пределах является вязкость. В гидродинамической же аналогии вязкость зависит от многих параметров процесса уплотнения: давления, скорости приложения нагрузки и др. Это не позволяет решать получающиеся уравнения аналитически, а при численном решении требуется вводить таблицы зависимости вязкости от упомянутых величин для каждого конкретного случая. Наконец, математический аппарат гидродинамики хорошо развит лишь для несжимаемых жидкостей, а пластифицированный порошок способен сжиматься до тех пор, пока пластификатор не займет в нем все межчастичное пространство.

2. Аналогия с компактным материалом. Сюда относятся попытки применить уравнения механики деформируемого твердого тела для описания поведения пластифицированных порошков. Основанием для этого является наличие у пластифицированного материала некоторой прочности даже при небольших нагрузках, что объясняется связующими свойствами пластификатора. Подобный эффект отсутствует как в жидкостях, так и в чисто порошковых материалах.

Математическое описание в рассматриваемом случае строится в терминах: предел текучести, коэффициент Пуассона, коэффициент трения... Эти параметры, оставаясь постоянными в известных пределах для компактных материалов,

являются сложными функциями вида напряженного состояния для сжимаемых смесей. Возникает такая же ситуация, как и в гидродинамике: проведение преобразований при переменных коэффициентах невозможно.

В механике обработки литых металлов давлением касательные напряжения на поверхности деформации обычно считают не зависящими от нормальных (их задают как часть предела текучести) или зависящими линейно (в этом случае пользуются коэффициентом трения). Иногда даже удается получить удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными, вовсе пренебрегая внешним трением. Это объясняется тем, что при прессовании компактных металлов большая часть энергии деформации затрачивается на изменение формы, на внутреннее трение. Поэтому закон внешнего трения не особенно важен.

Пластифицированный порошковый материал в неуплотняемом состоянии, принципиально не отличаясь от литого неупрочняемого, имеет предел текучести на несколько порядков меньше. Это приводит к уменьшению затрат на формоизменение и увеличению потерь на внешнее трение, которые могут составить до 95 % затраченной энергии. В такой ситуации малейшая неточность в задании граничных условий приводит к значительному расхождению результатов теории и эксперимента.

Наконец, об этой аналогии можно сказать то же, что и о гидродинамической: ее теория хорошо развита лишь для несжимаемых материалов.

3. Порошковая аналогия. Общей теории уплотнения порошковых материалов пока не существует. В основе такой теории должна лежать зависимость плотности порошкового тела от вида напряженного состояния, опирающаяся на инвариантные к напряжениям коэффициенты. Большое разнообразие порошковых материалов, используемых в технике, делает построение такой теории чрезвычайно сложной задачей.

Предприняты многочисленные попытки решения более простой задачи по отысканию связи между плотностью и давлением при равномерном всестороннем сжатии порошка. Получены многочисленные уравнения прессования, имеющие ограниченные применения. Универсальной зависимости даже для простейшего вида напряженного состояния не обнаружено.

В порошковой металлургии математическое описание обычно использует коэффициенты внешнего и межчастичного трения, коэффициент бокового давления. Эти величины даже для непластифицированных порошков зависят от давления.

Известно, что для пластифицированного порошка упомянутые коэффициенты не только зависят от давления, но и зависят нелинейно, а, следовательно, для построения общей теории деформации не пригодны. Необходимо найти инвариантные к давлению характеристики.

Исследование триботехнических характеристик пластифицированных порошков показало, что связь между касательными и нормальными напряжениями на поверхности трения в общем случае имеет вид:

$$\tau = a + b\sigma - c\sigma^2 \quad (1)$$

где τ и b - касательные и нормальные напряжения соответственно;

a, b, c - неотрицательные величины, инвариантные к напряжениям.

Исследован широкий класс материалов, включающий компактные (непористые) металлы, чистые металлические и керамические порошки, а также пластифицированные порошковые материалы с различными пластификаторами. Во всех случаях результаты хорошо ложатся на параболу и нет необходимости введения членов более высоких степеней.

Сравнение материалов разных классов позволяет сделать следующие выводы. Для компактных металлов коэффициент μ часто оказывается пренебрежимо мал, выражение (1) превращается в закон трения Кулона-Амонтона в широком интервале давлений. По мере увеличения давления даже при малом μ с удельный вес третьего члена растет и пренебрегать им уже нельзя.

Непластифицированные порошки, по сравнению с литыми металлами, имеют заметно больший коэффициент при b_2 , что зарегистрировано многими исследователями (если обработать их результаты в соответствии с предложенным соотношением). Большинство из них отмечают это как "уменьшение коэффициента трения с ростом давления".

Пластифицированные порошки имеют увеличенные коэффициенты a и c , кривая $t(b)$ нелинейна во всем исследованном интервале давлений. По мере увеличения содержания пластификатора упомянутые коэффициенты растут, а коэффициент b заметно уменьшается. Кроме того, чем больше в порошке пластификатора, тем меньше его триботехнические характеристики зависят от материала самого порошка.

Таким образом, соотношение (1) позволяет задать связь между нормальными и касательными напряжениями на поверхности трения с помощью трех не зависящих от напряжений коэффициентов. Такая инвариантность к напряжениям позволяет аналитически проинтегрировать основные уравнения, описывающие уплотнение порошковых тел, что снимает главное препятствие на пути построения общей теории их деформации.

С помощью экспериментально найденной зависимости (1) нами построена математическая модель процесса деформации пластифицированного порошкового материала, позволяющая рассчитывать напряжения и плотности в нем при различных видах воздействия.

При построении модели было использовано свойство неупрочняемости (пластически деформируется пластификатор, а не частицы порошка). Это условие хорошо выполняется в том случае, если пластификатор занимает все межчастичное пространство при напряжениях, необходимых для получения прессовки. В таком состоянии материал становится практически несжимаемым, и это тоже использовано при проведении преобразований. Последнее замечание делает невозможным перенесение полученных результатов на непластифицированные порошки, которые даже при отсутствии упрочнения принципиально сжимаемы.

Зона формования в общем случае представляет собой канал произвольного сечения с поверхностями, на которых могут действовать как пассивные (препятствующие перемещению материала), так и активные (способствующие перемещению) силы трения. Вдоль канала, от входа к выходу, направлена координата z . На входе (при $z=0$) на поверхностях канала давление b_0 . Ищется распределение напряжений вдоль зоны формования $b(z)$.

Такая постановка задачи обладает большой общностью - варьируя геометрию канала, наличие участков с активным и пассивным трением, а также учитывая способ создания давления на входе можно получить все известные методы формования порошков и даже изобретать новые. Так, при зоне формования, закрытой с одного или двух торцов при пассивном трении по всем поверхностям получим соответственно мундштучное прессование и прессование в закрытой прессформе. При одном открытом торце и наличии поверхности с активным трением - так называемый *softlogn*-метод (активное трение вдоль канала) или шнековое прессование (активная сила трения направлена под углом к направлению перемещения материала) и т.д.

Уравнение равновесия сил, действующих на элемент длиной dz , имеет вид:

$$dF = dF'' - dF' \quad (2)$$

где dF - разность сил, действующих на торцы элемента;

dF'' - активная сила трения, действующая на часть боковой поверхности элемента, принадлежащую подвижной поверхности канала (направлена против координаты z);

dF' - пассивная сила трения, действующая на неподвижную часть боковой поверхности.

Подстановка значений этих сил приводит к уравнению

$$Sdb = kltdz \quad (3)$$

где S - площадь поперечного сечения канала;

k - коэффициент бокового давления;

l - разность между частями профиля поперечного сечения, принадлежащими неподвижной и подвижной поверхностям.

Подстановка в это уравнение закона трения (1) дает дифференциальное уравнение

$$db = (a' + b'b - c'b^2) dz \quad (4)$$

решаемое при граничном условии $b(0) = b_0$ (5)

Коэффициенты a' , b' и c' являются постоянными величинами, зависящими от триботехнических характеристик материала и геометрии зоны формования:

$$a' = ak_1S, \quad b' = bk_1S, \quad c' = ck_1S \quad (6)$$

что позволяет проинтегрировать уравнение (4). Искомое распределение напряжений имеет вид

$$z = d \ln \frac{(\sigma_0 - e)(g - \sigma)}{(g - \sigma_0)(\sigma - e)} \quad (7)$$

где e и g - корни квадратного уравнения

$$a' + b'b + c'b^2 = 0 \quad (8)$$

$$d = \frac{1}{b' - 2c'g} \quad (9)$$

Полученное распределение напряжений позволяет найти распределение плотностей в формуемом материале - для этого в выражение (7) надо подставить какое-либо уравнение прессования, связывающее плотности с напряжениями (касательные напряжения находятся из (1)). Построенная таким образом математическая модель позволяет рассчитать энерго-силовые параметры при различных методах формования пластифицированных порошков. Это, в свою очередь, позволит выполнить конструкторские расчеты при создании формующего оборудования и инструмента.