

УДК 621.762.4

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПЛАСТИФИЦИРОВАННОМ ПОРОШКОВОМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ ЕГО ДЕФОРМАЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ФОРМУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**В.В. САВИЦКИЙ, В.В. СИЛИВОНЧИК**
(Витебский государственный технологический университет)

На основе анализа научных публикаций выявлено, что в теории формования пластифицированных порошков недостаточно исследовано поведение материала в цилиндрической части матрицы, обеспечивающей формование труб заданной формы и размеров. Предложено рассматривать деформацию пластифицированного порошка в зоне формования изделия. Приведена схема, используемая для проведения расчетов. Рассмотрен механизм деформации материала в зазоре между цилиндрическим участком матрицы и оправкой при экструзии пластифицированных порошков. Пластифицированный порошок в зоне формования представляет упругую беспористую среду. Для проведения расчетов использованы положения теории упругости. Совместное решение уравнений равновесия, связывающих напряжения и деформации, дифференциального уравнения движения упругого тела и закона трения при заданных граничных условиях позволило получить зависимость для определения напряжений, возникающих в материале. При расчете учитываются упругие свойства пластифицированных смесей. Значения упругих модулей порошковых материалов предлагается находить через модуль Юнга и коэффициент Пуассона, которые рассчитываются на основе экспериментальных значений поперечного и продольного упругого последействия.

Процесс экструзии пластифицированных порошков достаточно хорошо изучен, о чем свидетельствует значительное количество публикаций. Пластифицированные порошки начали использоваться достаточно давно при получении труб методом мундштучного прессования [1 – 2]. Первые данные об использовании пластифицированных металлокерамических материалов изложены в работах [3 – 4]. При описании истечения пластифицированных порошков учитывались их пластические свойства, а поведение при формовании описывалось уравнением Бингама – Шведова. Авторами теоретически рассчитано усилие червячного пресса при формовании пластифицированной окиси алюминия. Полученные теоретические зависимости проверялись экспериментально с помощью разработанных методик и приборов. При сравнении расчетных и экспериментальных значений получена удовлетворительная сходимость данных. Результаты многолетней работы по исследованию процесса экструдирования реологических порошковых композиций шнековым прессованием обобщены в работе [5]. При теоретическом исследовании процесса уплотнения порошкового материала в канале шнека и формующем инструменте использовалась модель вязкой порошковой композиции и уравнение неразрывности ее течения в канале шнека. Такой же подход использован и в ряде других исследований. В работе [6] построена модель процесса экструзии пластифицированного порошка, представляющая собой ряд механических и термодинамических задач, которые связаны начальными и граничными условиями. Деформация материала осуществляется за счет течения пластичной фазы без деформирования частиц порошка. В результате решения уравнений найдено распределение давлений в конической части матрицы. В приведенной работе показано, что пластифицированные порошки представляют новый класс материалов со специфическими физическими и технологическими свойствами. Некоторые авторы предпринимали попытки использования математического аппарата механики твердого тела для описания деформации двухфазных смесей [7, 8]. Однако искомые уравнения решены с учетом допущений, в соответствии с которыми параметры, определяющие уплотнение среды, не зависят от вида напряженного состояния либо зависят линейно.

Наибольшее внимание исследователи уделяют поведению экструдированного материала в канале шнека при транспортировании к зоне деформирования – рассматривают вопросы пластического течения порошков в зазоре между шнеком и корпусом, в конусной части матрицы.

Изучению деформирования материала в цилиндрической части матрицы уделяется незаслуженно мало внимания, несмотря на то, что в этой части инструмента формируется заготовка заданных размеров, и без него получить заготовку не представляется возможным. Необходимо обеспечить снижение напряжений в материале до значений, не превышающих некоторого предела для формуемой смеси.

Поскольку порошковые материалы, в том числе и пластифицированные, обладают не только пластическими, но и упругими свойствами [9], предлагается рассматривать поведение материала в конусной и цилиндрической части инструмента отдельно. Причем в конусной части материал обладает преимущественно пластическими свойствами, в цилиндрической части – преобладают упругие свойства формуемой смеси. В пределах принятых разграничений появляется возможность рассматривать поведение пластифицированного материала только в зоне формования готового изделия, в которой наблюдается его упругая разгрузка.

Схема формования тонкостенных заготовок на шнековом прессе представлена на рисунке 1. Шнек 1 наружным диаметром D непрерывно подает порошок в зазор между матрицей 2 и насадкой 3. В конусной части матрицы происходит уплотнение подаваемого материала до тех пор, пока давление, развиваемое шнеком, не превысит предел текучести порошковой смеси. В этом случае материал начнет выдавливаться в кольцевой зазор между цилиндрической частью матрицы и оправкой 4. В зазоре происходит формование изделия в виде трубы требуемых размеров.

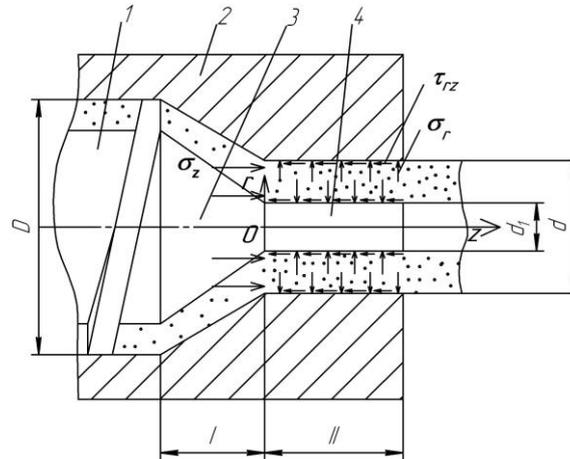


Рис. 1. Расчетная схема для определения напряжений в пластифицированном материале, находящемся в цилиндрической части матрицы

Рассмотрим процесс экструзии в установившейся фазе при изотермических условиях протекания. В зоне формования готового изделия его плотность практически не изменяется. Пластифицированная смесь в указанной зоне представляет упругую беспористую среду, состоящую из смеси однородных частиц порошкового материала и равномерно распределенного пластификатора. Пусть массовые силы равны нулю, а переходные процессы на границе зоны I и II и пульсации давления, возникающие из-за вращения шнека, на входе в кольцевой зазор отсутствуют, причем давление равномерно распределено по зазору, и его величина соответствует давлению истечения пластифицированного материала. В общем случае $D \gg d$, где D – диаметр шнека; d – диаметр цилиндрической части матрицы. В матрице имеются две зоны: I – зона пластического течения; II – зона формования готового изделия. Обозначим: L – длина зоны пластического течения; l – длина цилиндрической части матрицы; d_1 – диаметр оправки. Используем систему координат, в которой 0 – начало системы координат, σ_z – напряжение в материале на входе в цилиндрическую часть матрицы, равномерно распределенное по поперечному сечению, σ_r – нормальные напряжения, действующие со стороны материала на поверхность оправки и матрицы, τ_{rz} – касательные напряжения на поверхности матрицы и оправки, вызванные силой трения.

Для описания поведения порошкового тела, находящегося в цилиндрической части матрицы, используется обобщенный закон Гука в виде [10]:

$$\begin{cases} \sigma_i = \lambda \Delta + 2\mu \varepsilon_i; \\ \tau_{ij} = \mu \gamma_{ij}, \end{cases} \quad (1)$$

где σ_i – нормальные напряжения, действующие по соответствующим направлениям 1, 2, 3 (1 – в радиальном; 2 – в окружном направлении; 3 – в направлении экструзии); λ , μ – коэффициенты Ламе (λ – модуль объемного сжатия; μ – модуль сдвига); Δ – объемная деформация; ε_i – деформация по соответствующим направлениям; τ_{ij} – касательные напряжения; γ_{ij} – углы сдвига в цилиндрических координатах.

На направлениях 1, 2, 3 действуют нормальные напряжения σ_1 , σ_2 , σ_3 .

В соответствии с законом Гука указанные напряжения определяются следующим образом:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \lambda(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + 2\mu\varepsilon_1, \\ \sigma_2 = \lambda(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + 2\mu\varepsilon_2, \\ \sigma_3 = \lambda(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + 2\mu\varepsilon_3. \end{cases} \quad (2)$$

Выражения деформаций через перемещения в цилиндрических координатах имеют вид:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial W_1}{\partial r}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial W_1}{\partial \theta} + \frac{W_1}{r}; \quad \varepsilon_3 = \frac{\partial W_3}{\partial z}. \quad (3)$$

Пусть перемещение по r интерполируется линейной зависимостью вида:

$$W_1 = Ar + B, \quad (4)$$

где A, B – константы.

Константа B находится из граничного условия $B_{r_0} = 0$ – перемещение центра равно нулю.

Для трубы с малой толщиной стенки принимаем $W_1 = Ar$, или

$$\frac{W_1}{r} = A. \quad (5)$$

Примем деформации тела по направлениям r и θ постоянными:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = A = const, \quad (6)$$

где A – некоторое число, численно равное относительному упругому последствию по r .

Величина относительного упругого последствия по r и r_1 ввиду малой разности диаметров одинакова. Учитывая (3) – (6), система (2) приобретает вид:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_2 = (\lambda + 2\mu)2A + \frac{\lambda \partial W_3}{\partial z}, \\ \sigma_3 = 2\lambda A + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial W_3}{\partial z}. \end{cases} \quad (7)$$

Для преобразования первое уравнение системы (7) умножается на $(\lambda + 2\mu)$, а второе – на λ , полученные уравнения вычитаются, затем σ_1 выражается через σ_3 :

$$\sigma_1 = \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} \sigma_3 + \frac{(6\lambda\mu + 4\mu^2)}{(\lambda + 2\mu)} A. \quad (8)$$

При установившемся режиме формования имеет место трение только по внутренней поверхности цилиндрической части матрицы и по наружной поверхности оправки, находящейся в зоне упругой разгрузки, так как изделие движется только в направлении выдавливания. Межчастичное трение по направлению r и трение из-за поворота смеси в матрице по направлению θ отсутствуют. Дифференциальное уравнение движения упругого тела вдоль указанного направления выражается следующим образом [10]:

$$\frac{\partial r \tau_{13}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{23}}{\partial \theta} + r \frac{\partial \sigma_3}{\partial z} + Z = \rho \frac{\partial^2 W_3}{\partial t^2}, \quad (9)$$

где ρ – плотность тела; Z – массовые силы, действующие вдоль указанных направлений; W_3 – перемещение частиц материала в направлении экструзии.

Учитывая основные допущения, принятые для модели формования:

$$\frac{\partial \tau_{23}}{\partial \theta} = 0; \quad \frac{\partial W_3}{\partial t} = 0; \quad Z = 0, \quad (10)$$

зависимость (9) приобретает следующий вид:

$$\frac{\partial r \tau_{13}}{\partial r} + \frac{r \partial \sigma_3}{\partial z} = 0. \quad (11)$$

Поскольку зазор между матрицей и оправкой мал, для определения трения на всей поверхности цилиндрической части матрицы и поверхности оправки выражение (11) осредняется по r от r_1 до r , где $2r_1$ – диаметр оправки; $2r$ – диаметр цилиндрической части матрицы, и по θ от 0 до 2π .

$$\tau_{13/r} - \tau_{13/r_1} + \frac{1}{2}(r^2 - r_1^2) \frac{\partial \sigma_3}{\partial z} = 0. \quad (12)$$

После выполнения преобразований выражение (12) примет вид:

$$\tau_{13} + \frac{(r + r_1)}{2} \frac{\partial \sigma_3}{\partial z} = 0. \quad (13)$$

В общем случае зависимость касательных напряжений τ_{13} от различных факторов выражается законом:

$$\tau_{13} = f_1(\sigma, \rho, r, \dots), \quad (14)$$

где σ , ρ , r – соответственно действующее напряжение, плотность тела, радиус формующего инструмента и т.д.

С учетом принятых допущений, при которых $\rho = \text{const}$, $r = \text{const}$,

$$\tau_{13} = f \sigma_1, \quad (15)$$

где f – коэффициент внешнего трения порошкового материала по поверхности матрицы и оправки; σ_1 – нормальное напряжение на поверхности трения.

С учетом выражений (13) и (15) уравнение (8) приобретает вид:

$$\frac{f\lambda}{\lambda + 2\mu} \sigma_3 + \frac{6\lambda\mu + 4\mu^2}{\lambda + 2\mu} A + \frac{(r + r_1)}{2} \frac{\partial \sigma_3}{\partial z} = 0. \quad (16)$$

Полученное однородное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами имеет решение

$$\sigma_3 = C e^{-\frac{2f\lambda}{(\lambda+2\mu)(r+r_1)z}} - \frac{6\lambda\mu + 4\mu^2}{f\lambda} A, \quad (17)$$

где C – постоянная интегрирования, которая может быть определена из граничных условий. Для ее расчета используем следующие граничные условия: на выходе изделия из цилиндрической части матрицы

$$z = l, \quad \sigma_3 = 0. \quad (18)$$

Тогда из выражения (17)

$$C = \frac{6\lambda\mu + 4\mu^2}{f\lambda} A e^{\frac{2f\lambda}{(\lambda+2\mu)(r+r_1)l}}. \quad (19)$$

Зная постоянную интегрирования, найдем напряжения в любой точке материала, находящегося в цилиндрической части матрицы длиной l :

$$\sigma_3 = \frac{6\lambda\mu + 4\mu^2}{f\lambda} A \left(e^{\frac{2f\lambda}{(\lambda+2\mu)(r+r_1)(l-z)}} - 1 \right). \quad (20)$$

Полученная зависимость может быть использована для определения давления, которое должен развивать шнек для выдавливания материала через цилиндрическую часть формующего инструмента.

Из приведенной зависимости следует, что напряжения, возникающие в материале, зависят от упругих свойств деформируемой смеси, силы трения материала о поверхность матрицы и оправки, геометрии формующего инструмента и длины цилиндрической части матрицы. Упругие свойства экструдированного материала определяются в основном содержанием пластификатора. Изменять геометрию формующего инструмента не представляется возможным, поскольку размеры матрицы обеспечивают получение изделий заданных размеров. Изменение коэффициента трения при давлениях 20...30 МПа, при которых формуется большинство пластифицированных материалов, составляет 0,01...0,02. Уменьшить

напряжения в материале можно в том случае, когда устраняется трение материала по наружной и внутренней поверхности формируемого изделия. Устранить трение по наружной поверхности формируемого изделия практически невозможно. Технически достаточно просто организовать формование труб на подвижную оправку, перемещаемую экструдированным материалом через цилиндрическую часть матрицы. В этом случае сопротивление инструмента выдавливанию за счет отсутствия трения по внутреннему диаметру трубы уменьшится, что создает условия для уменьшения энергосиловых затрат на экструзию изделий.

В полученной выше зависимости используется два модуля: объемного сжатия и сдвига (модули Ламе), значения которых необходимо знать для численного решения поставленной задачи.

Упругие коэффициенты могут быть выражены через модуль Юнга (E) и коэффициент Пуассона (ν) следующими зависимостями, полученными после некоторых преобразований [8, с. 363]:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}; \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (21)$$

Данных об искомых модулях для пластифицированных порошков в научной и справочной литературе не обнаружено. Поэтому предлагается вначале с помощью экспериментальных исследований найти величины относительного поперечного и продольного упругого последствия, затем рассчитывать модуль Юнга и коэффициент Пуассона, коэффициенты Ламе и определять напряжения в материале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самсонов Г.В. Новая технология производства труб и стержней из порошков тугоплавких металлов и соединений. – М.: Изд-во ВИНТИ, 1959.
2. Кислый П.С., Самсонов Г.В. Основы процесса мундштучного прессования труб и стержней из порошков тугоплавких соединений // Порошковая металлургия. – 1962. – № 3. – С. 31 – 48.
3. Сторож Б.Д., Кислый П.С. Расчет усилия червячного пресса для формования изделий из пластифицированных порошковых масс // Развитие методов формования изделий из порошков: Сб. ст. – Киев: Ин-т проблем материаловедения АН УССР. – 1976. – С. 62 – 71.
4. Сторож Б.Д., Кислый П.С. Исследование особенностей процесса формования ППМ на вакуумном червячном прессе // Развитие методов формования изделий из порошков: Сб. ст. – Киев: Ин-т проблем материаловедения АН УССР. – 1976. – С. 142 – 151.
5. Клименков С.С. Теория и технология экструдирования реологических порошковых композиций методом шнекового прессования, создание оборудования и внедрение в народное хозяйство: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Мн.: БРНПОПМ, 1991. – 34 с.
6. Пятов В.В. Теоретические и технологические основы экструзии пластифицированных порошков: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: БГНПКПМ, 2005. – 44 с.
7. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
8. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
9. Кипарисов Г.А., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия: Учеб. для техникумов. – М.: Металлургия, 1991. – 432 с.
10. Ландау И.Л., Лившиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1965. – 204 с.