

С.Г. АГБАЛЯН, Г.Х. КАРАПЕТЯН, А.А. ПЕТРОСЯН, А.С. АГБАЛЯН

## КОМПАКТИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Обоснована целесообразность компактирования износостойких антифрикционных порошковых материалов экструзией, работающих в условиях тяжелого нагружения в режиме сухого трения. Выявлен механизм процесса экструзии порошковых материалов, содержащих в структуре твердые смазывающие вещества.

*Ключевые слова:* порошок, прессование, пористость, экструзия, компактирование, смазывающие вещества, антифрикционный материал.

Теория и практика порошковой металлургии показывают, что какими бы большими ни были усилия формования и скорости их приложения, получить беспористый материал непосредственным (в состоянии насыпки) компактированием металлических порошков практически невозможно. Даже высокие температуры и длительное их воздействие не обеспечивают сплошности структуры. Полное компактирование металлических порошков может быть достигнуто только лишь поэтапно:

1. Предварительное формование их в пористую заготовку, со спеканием или без него.
2. Горячая обработка пористой заготовки давлением (формоизменение и уплотнение до  $\theta \rightarrow 0$ ).

В связи с этим весьма эффективной является экструзия, которая не только обеспечивает формирование компактных структур, но и позволяет получить материал с повышенными физико-механическими и технологическими свойствами.

Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы является исследование процессов компактирования износостойких антифрикционных порошковых материалов (ИАПМ) методами экструзии.

Жесткие требования к прессуемости, спекаемости и другим свойствам металлических порошков, зависящим от размеров и формы частиц, их физического состояния, предъявляемые при статическом прессовании без нагрева, утрачивают свое значение при горячей обработке, которая характеризуется большой скоростью и степенью деформации (60...90%). Процессы структурообразования в этом случае лимитируются не диффузией, как при обычном спекании, а высокотемпературной пластической деформацией частиц. Это значительно расширяет технологические возможности экструзии по компактированию порошков металлов и сплавов без строгого ограничения их свойств.

В работах [1-2] основные параметры экструзии рассматриваются только лишь на примерах однофазных материалов. Согласно [3], давление экструзии рассчитывают по формуле

$$P_0 = K b_B e^{R \lambda} \ln \lambda n. \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент, равный 2,5 ... 3,5;  $b_B$  – предел прочности на разрыв при температуре экструзии, МПа;  $f$  – коэффициент трения;  $L$  – длина заготовки;  $R_k$  – радиус контейнера (заготовки);  $\lambda = F_k / F_M$  – коэффициент вытяжки;  $F_k$  – площадь поперечного сечения заготовки;  $F_M$  – площадь отверстия матрицы.

Для триботехнических материалов, относящихся к двух- и трехфазным структурам, формула (1) неприемлема. Рассмотрим процесс экструзии сплавов, содержащих в качестве фазы твердые смазывающие вещества (рис. 1). Динамика процесса экструзии пористой заготовки с однофазной структурой состоит из четырех стадий (рис. 2). На первой стадии происходит уплотнение заготовки до 95...96 %. Соответственно, давление экструзии ( $P_0$ ) и давление, возникающее в матрице ( $P_M$ ), значительно возрастают, вследствие чего начинается вытеснение части металла в зону матричной воронки. На второй стадии  $P_0$  и  $P_M$  достигают своих максимальных значений, заготовка уплотняется до 99...100%, т.е. практически до компактного состояния. На третьей стадии устанавливается ламинарное истечение металла из матрицы. Четвертая стадия является завершающей и отвечает нестационарному течению металла.

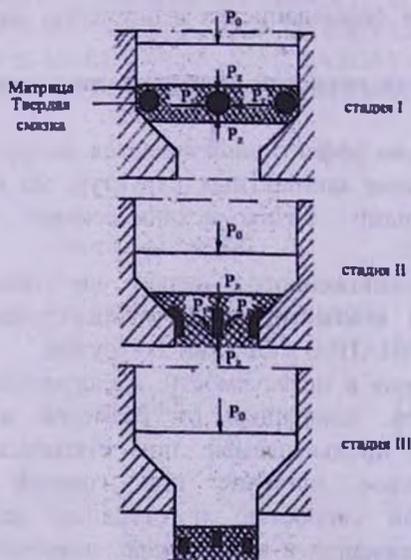


Рис. 1. Механизм процесса экструзии материала, содержащего в структуре твердые смазывающие вещества

Процессу экструзии материалов с многофазной структурой присущи иные закономерности. На первой стадии происходит уплотнение пористой заготовки до 93...95%,  $P_0$  и  $P_M$  достигают максимальных значений. На второй стадии заготовка уплотняется до 97...98%, происходит поляризация концентраций напряжений (рис. 1, стадия II), превосходящих по величине предел текучести второй фазы и композиции в целом.

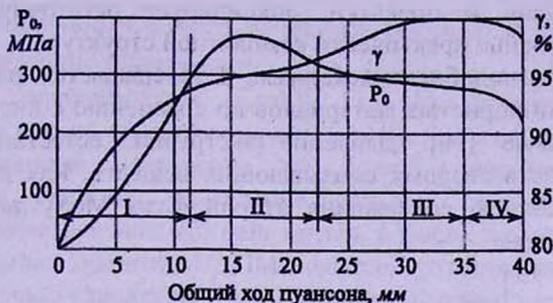


Рис. 2. Динамика уплотнения ИАПМ при экструзии пористой заготовки (материал Fe-Mo-MoS<sub>2</sub>,  $\lambda=4$ )

В общем виде условие пластического деформирования характеризуется критерием пластичности:

$$f(\sigma_{ij}, K_n, q) = 0,$$

где  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $K_n$  – параметр, определяющий свойства материала;  $q$  – коэффициент упрочнения.

Для наглядности  $f$  изображают в виде поверхности пластичности (в пространстве основных инвариантов тензора напряжений или главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ).

В теории пластичности компактных металлов используются в основном критерии пластичности Губера – Мизеса и Треска – Сен-Венана, с которыми в пространстве главных напряжений связаны поверхности пластичности в виде кругового цилиндра, равнонаклоненного к осям координат, и шестигранной призмы бесконечной длины, вписанной в этот цилиндр. Обе поверхности разомкнуты  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$  [4], т.е. компактные металлы неуплотняемы (несжимаемы).

Пористые металлы уплотняемы, т.е. сжимаемы. Поэтому поверхность пластичности пористых металлов должна быть замкнутой в направлении  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ . В литературе предложен ряд критериев пластичности, учитывающих эту особенность пористых материалов [5]. Лучшее согласие с экспериментом имеет критерий пластичности Куна и Дауни [6]:

$$f = \alpha I_1^2 + 3I_2' - \beta \sigma_3^2 = 0,$$

где  $\alpha, \beta$  – функции пористости;  $I_1$  – первый инвариант тензора напряжений;  $I_2'$  – первый инвариант девиатора напряжений.

Критерию пластичности соответствует поверхность пластичности в виде эллипсоида вращения, равнонаклоненного к осям координат. При  $\alpha=0$  и  $\beta=1$  критерий пластичности переходит в критерий Губера – Мизеса.

В [7, 8] предложена обобщенная теория пластичности пористого тела, основанная на концепции среднеквадратичных вязких напряжений и скоростей деформации, развитой в [9].

Именно наличие девнатора напряжений, присущих только лишь процессам экструзии и прокатки, ликвидирует остаточную пористость и обеспечивает получение практически компактной структуры.

Правильность подобного механизма подтверждается выводом о том, что давление экструзии пористых материалов по сравнению с литыми материалами на 20...25% меньше [10]. Давление экструзии, естественно, зависит от количества и свойств твердых смазывающих веществ. Как видно из рис. 3, с увеличением объемного содержания второй фазы  $\text{MoS}_2$  давление экструзии заметно уменьшается.

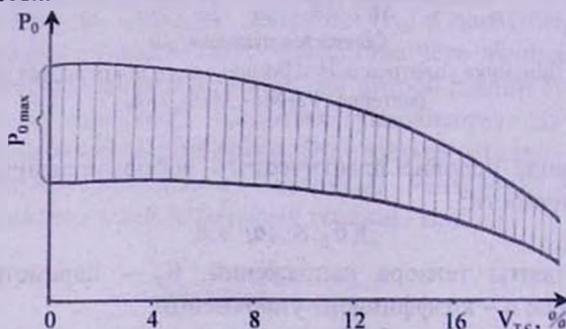


Рис. 3. Зависимость давления экструзии от содержания твердой смазки (материал – трехфазный ИАИМ, твердая смазка –  $\text{MoS}_2$ )

Математической обработкой результатов экспериментов получена формула для расчета давления экструзии, учитывающая влияние второй фазы:

$$P_0 \geq K \left[ (1-m) \sigma_s e^{2\epsilon_0/R_n} \cdot \ln \lambda + m \sigma_{\text{IIф}} e^{2\epsilon_0/R} \cdot \ln \frac{D^2}{R^2} \right], \quad (2)$$

где  $m$  – относительное содержание второй фазы;  $\sigma_s$  – предел прочности основной фазы при растяжении (при температуре экструзии);  $\sigma_{\text{IIф}}$  – предел прочности второй фазы при растяжении в процессе экструзии;  $f_1$  – коэффициент трения второй фазы с основной фазой;  $D, R$  – соответственно диаметр и радиус зерна второй фазы.

Поскольку у антифрикционных материалов коэффициент трения ( $f_1$ ) и предел прочности ( $\sigma_{\text{IIф}}$ ) обычно меньше, чем у материала матрицы, то, естественно, давление экструзии будет меньше.

Как известно, основными факторами, непосредственно влияющими на процесс экструзии, являются:  $T$ , – температура нагрева,  $\tau$ , – продолжительность нагрева,  $\lambda$  – коэффициент вытяжки,  $\alpha_M$  – угол матрицы,  $V_3$  – скорость экструзии. По результатам предварительных экспериментов нами выбрана математическая модель типа

$$b_B = c \left( \frac{T_0}{100} \right)^x \tau^y \lambda^z, \quad (3)$$

где  $b_B$  – предел прочности ИАПМ на разрыв, МПа;  $c$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – неизвестные параметры, подлежащие определению.

Располагая зависимостью  $b_B = f(T_0, \tau, \lambda)$ , можно оптимизировать параметры экструзии, но не прогнозировать свойства. Эксперименты показали, что экструдированные материалы не всегда приобретают наилучшие триботехнические свойства, выявление которых связано с проведением испытаний на трение и износ. На наш взгляд, к числу важных свойств, позволяющих качественно оценить ИАПМ, следует отнести внутреннее трение, являющееся основным структурно-чувствительным параметром.

Результаты исследований показали, что кривые внутреннего трения получают максимальные значения только при определенных деформациях (рис. 4), при которых материал приобретает наилучшие триботехнические свойства.

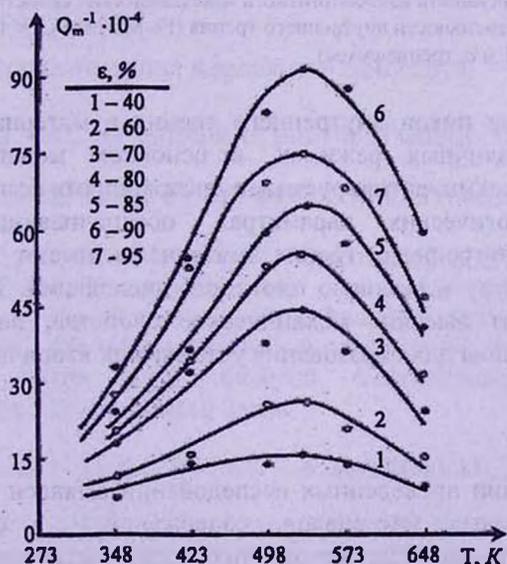


Рис. 4. Изменение интенсивности внутреннего трения от температуры при различных степенях деформации ( $Fe-Mo-MoS_2$ )

На рис. 5 показано изменение износостойкости материала в зависимости от пиков внутреннего трения. Как видно, с увеличением пиков износостойкость возрастает.

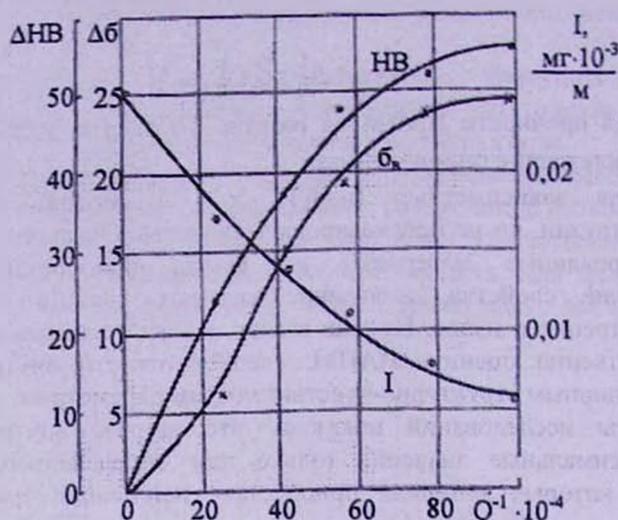


Рис. 5. Зависимость износостойкости и механических свойств ИАПМ от интенсивности внутреннего трения ( $\text{Fe-Mo-MoS}_2$ ,  $Q=1 \text{ МПа}$ ,  $V=1 \text{ м/с}$ , трение сухое)

Возникновение пиков внутреннего трения в материалах, подвергшихся экструзии при различных режимах, в основном можно объяснить диффузионными процессами, активируемыми дислокациями большой плотности.

При технологических параметрах, обеспечивающих максимальные значения пиков внутреннего трения, материалы имеют более однородную химическую структуру и высокую плотность дислокаций. Такие материалы не только приобретают высокие механические свойства, но в них создаются благоприятные условия для образования устойчивых вторичных структур.

## Выводы

1. На основании проведенных исследований выявлен механизм процесса экструзии порошковых материалов, содержащих в структуре твердые смазывающие вещества. Параметры процесса экструзии зависят как от механических свойств исходных компонентов, так и от объемного содержания структурных составляющих.

2. Выявлено, что кривые внутреннего трения получают максимальные значения только при определенных деформациях, при которых материал приобретает наилучшие триботехнические свойства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петросян Л.Г. Деформационная теория пластичности пористых материалов // Известия вузов. Сер. Машиностроение.- 1978.-№ 11.- С. 5 - 8.
2. Напряженно-деформированное состояние пористых композиционных материалов при сжатии / Н.В. Манукян, Г.Л. Петросян, Б.Ц. Минасян и др. // Порошковая металлургия.-1982.- № 1.- С. 84 - 88.
3. Манукян Н.В. Технология порошковой металлургии.- Ереван: Айастан, 1986.- 231 с.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести.- М.: Машиностроение, 1975.- 399 с.
5. Лаптев А.И. Критерии пластичности пористых металлов // Порошковая металлургия.-1982.- № 7.- С. 12 - 18.
6. Kuhn H.A., Dawney C.L. Deformation characteristics and plasticity theory of sintered powder materials // Int. J. Powder met.- 1971.- 7, № 1.- P. 15 - 25.
7. Мартинова И.Ф., Штерн М.Б. Уравнение пластичности пористого тела, учитывающее истинные деформации материала основы // Порошковая металлургия.- 1978.- №1. - С. 23-29.
8. Феноменологические теории прессования порошков / М.Б. Штерн, Г.Г. Сердюк и др.-Киев: Наукова думка, 1982.- 140 с.
9. Скороход В.В. Реологические основы теории спекания.- Киев: Наукова думка, 1972.-148 с.
10. Агбальян С.Г. Теоретические и технологические основы формирования структуры и свойств порошковых материалов при экструзии: Автореф. дис. ... докт. техн. наук.- Ереван, 1992.- 33 с.

ГИУА (П). Материал поступил в редакцию 26.09.2010.

Ս.Գ. ԱԴԲԱԼՅԱՆ, Գ.Խ. ԿԱՐԱԴԵՏՅԱՆ, Ա.Ա. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ա.Ս. ԱԴԲԱԼՅԱՆ

ՍԱՇՎԱԿԱՅՈՒՆ ԶԱՎԱՇՓՈՒԿԱԼ ՓՈՇԵԼՆՈՒԹԵՐԻ ԽՏԱՅՈՒՄԸ

Հիմնավորվել է չոր շփման և ծանր բեռնվածության պայմաններում աշխատող մաշակայուն հակաշփական փոշենյութերի՝ տաք արտամղմամբ խտացման նպատակահարմարությունը: Բացահայտվել է կառուցվածքում պինդ քսանյութեր պարունակող փոշենյութերի տաք արտամղման գործընթացի մեխանիզմը:

*Առանցքային քանոթ.* փոշի, մամլում, ծակոտկենություն, արտամղում, խտացում, քսանյութեր, հակաշփական նյութ:

S.G. AGHBALYAN, G.X. KARAPETYAN, A.A. PETROSYAN, A.S. AGHBALYAN

COMPACTION WEARPROOF ANTIFRACTIONAL POWDER MATERIALS

The expediency compaction wearproof antifrictional powder material extrusion for dry friction working in the conditions of heavy loading is proved. The power material extrusion process mechanism containing in the structure of solid greasing substances is revealed.

*Keywords:* powder, pressing, porosity, extrusion, compaction, greasing substances, antifriction material.