

УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛИ ПЛАСТИЧНОСТИ УПЛОТНЯЕМОЙ ПОРОШКОВОЙ СРЕДЫ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь*

Considered problem of study, stress surface form in process of plastic deformation. Received plastic model, allowing complex take into accounts the structured changes to process of pressing.

Одной из актуальных задач в теории порошковой металлургии является проблема изучения формы поверхности нагружения в процессе пластического деформирования, связанная с решением закономерностей упрочнения с учетом структурных особенностей пористым порошковых материалов (ПМ).

Применение условия сплошности к ПМ привело к появлению целого ряда условий пластичности, учитывающих специфику поведения материала. Экспериментальные исследования, проведенные Мидуковым В.З. [1] и японскими учеными, свидетельствуют о том, что форма поверхности текучести пористых материалов в плоскости $p-T$ представляется эллипсом, сдвинутым вдоль гидростатической оси.

Модель пластичности в виде сдвинутого эллипсоида вращения имеет шире диапазон использования схем нагружения (от растяжения до гидростатического сжатия). Она учитывает различие в пределах текучести ПМ на сжатие и растяжение. Однако для процессов изостатического прессования (ИП) более предпочтительна модель пластичности в виде центрального эллипсоида, так как в основных уравнениях модели отсутствует достаточно сложный параметр смещения центра эллипсоида вдоль гидростатической оси, что позволит получить с достаточной точностью простые зависимости для расчета свойств и технологических параметров исследуемых схем ИП.

Поверхность нагружения в виде эллипсоида вращения имеет вид [2]:

$$\frac{3p^2}{\psi^2} + \frac{2T^2}{\varphi^2} = 1, \quad (1)$$

где $T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}$ — интенсивность касатель-

ных напряжений; ψ и φ функции механических характеристик уплотняе-

мых материалов; $p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ — гидростатическое давление;

В технологических процессах прессования деталей из порошков изучаемые материалы подвергаются обработке давлением по траекториям нагружения, лежащим в диапазоне от схемы осевого уплотнения до гидростатического равномерного сжатия. Определим теперь, по каким двум задаваемым напряжениям необходимо строить критерий пластичности вида (1). В качестве двух отыскиваемых допустимых напряжений можно выбрать сопротивление деформированию порошковых брикетов в двух схемах нагружения: осевое прессование в жесткой матрице без внешнего трения и радиально-изостатическое прессование.

При осевом прессовании в закрытой матрице в отсутствии сил внешнего трения для компонент тензора напряжений будет выполняться следующее условие [3]:

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \xi_{on} \sigma_{on}, \quad (2)$$

где σ_1 — напряжение прессования равно $\sigma_1 = \sigma_{on}$, ξ_{on} — коэффициент бокового давления, зависящий от плотности и свойств порошка, равный $\xi_{on} = \frac{\sigma_2}{\sigma_{on}}$.

С учетом (2) уравнение поверхности нагружения (1) примет вид:

$$\frac{(1 + 2\xi_{on})^2 \sigma_{on}^2}{3\psi^2} + \frac{2(1 - \xi_{on})^2 \sigma_{on}^2}{3\varphi^2} = 1. \quad (3)$$

где σ_{on} — сопротивление деформированию ПМ при осевом прессовании в закрытой матрице в отсутствие сил внешнего трения.

Из уравнения (3) определим φ :

$$\varphi = \frac{\sqrt{2}(1 - \xi_{on})\sigma_{on}\psi}{\sqrt{3\psi^2 - (1 + 2\xi_{on})^2 \sigma_{on}^2}} \quad (4)$$

При радиально-изостатической схеме нагружения для компонент тензора напряжений выполняется следующее условие:

$$\sigma_1 = \sigma_2, \quad \sigma_3 = \xi_{pad} \sigma_{un}, \quad (5)$$

где σ_1 — напряжение прессования равно $\sigma_1 = \sigma_{un}$, ξ_{pad} — коэффициент бокового давления при радиальном прессовании, зависящий от плотности и свойств порошка, равный $\xi_{pad} = \frac{\sigma_3}{\sigma_{un}}$.

Тогда уравнение поверхности нагружения (1) примет вид:

$$\frac{(2 + \xi_{pad})^2 \sigma_{un}^2}{3\psi^2} + \frac{2(1 - \xi_{pad})^2 \sigma_{un}^2}{3\varphi^2} = 1. \quad (6)$$

где σ_{un} — сопротивление деформированию ПМ при радиально-изостатическом прессовании.

Выразим ϕ из уравнения (6):

$$\phi = \frac{\sqrt{2}(1-\xi_{рад})\sigma_{un}\psi}{\sqrt{3\psi^2 - (2+\xi_{рад})^2\sigma_{un}^2}} \quad (7)$$

Приравняв правые части (4) и (7) определим ψ :

$$\psi = \sigma_{on}\sigma_{рад}\sqrt{\frac{(1-\xi_{рад}\xi_{он})(4\xi_{он}-\xi_{рад}\xi_{он}-2\xi_{рад}-1)}{(1-\xi_{рад})^2\sigma_{un}^2 - (1-\xi_{он})^2\sigma_{on}^2}} \quad (8)$$

Определим ϕ , подставляя (8) в уравнение (7):

$$\phi = \sqrt{2}\sigma_{on}\sigma_{рад}\sqrt{\frac{(1-\xi_{рад}\xi_{он})(4\xi_{он}-\xi_{рад}\xi_{он}-2\xi_{рад}-1)}{(1+2\xi_{он})^2\sigma_{on}^2 - (2+\xi_{un})^2\sigma_{un}^2}} \quad (9)$$

Тогда, условие пластичности (1) примет вид:

$$\frac{3p^2\left((1-\xi_{рад})^2\sigma_{un}^2 - (1-\xi_{он})^2\sigma_{on}^2\right)}{\sigma_{on}^2\sigma_{рад}^2(1-\xi_{рад}\xi_{он})(4\xi_{он}-\xi_{рад}\xi_{он}-2\xi_{рад}-1)} + \frac{T^2\left((1+2\xi_{он})^2\sigma_{on}^2 - (2+\xi_{un})^2\sigma_{un}^2\right)}{\sigma_{on}^2\sigma_{рад}^2(1-\xi_{рад}\xi_{он})(4\xi_{он}-\xi_{рад}\xi_{он}-2\xi_{рад}-1)} = 1,$$

или

$$\frac{3p^2\left((1-\xi_{рад})^2\sigma_{un}^2 - (1-\xi_{он})^2\sigma_{on}^2\right) + T^2\left((1+2\xi_{он})^2\sigma_{on}^2 - (2+\xi_{un})^2\sigma_{un}^2\right)}{\sigma_{on}^2\sigma_{рад}^2(1-\xi_{рад}\xi_{он})(4\xi_{он}-\xi_{рад}\xi_{он}-2\xi_{рад}-1)} = 1. \quad (10)$$

Для определения сопротивлений деформированию $\sigma_{он}$ и σ_{un} при выбранных системах нагружения воспользуемся зависимостью плотности от давления прессования:

$$\sigma_{он,un} = \sigma_0 \left(\frac{1+\nu}{1-\nu}\right)^m \left(e^{\nu-\nu_0} - 1\right), \quad (11)$$

где σ_0 — предел текучести металла частиц порошка; m — показатель упрочнения.

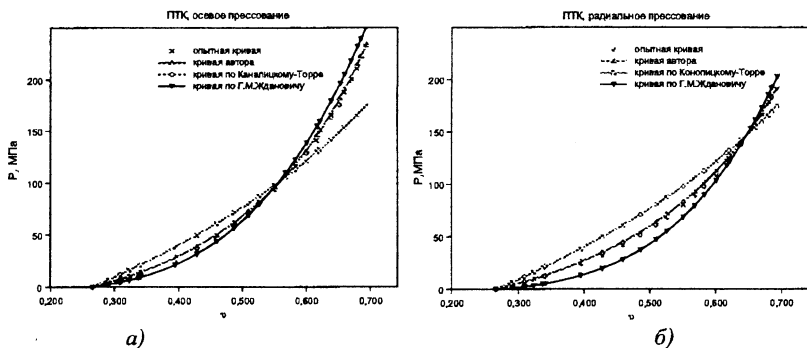


Рис. 1. График зависимости прессования порошка титана ПТК
 а) осевое прессование, б) радиальное прессование

На рисунке 1 показаны графики зависимости давления прессования от плотности брикета титанового порошка ПТК с параметрами упрочнения: для осевой схемы нагружения МПа, и радиальной МПа. Расчетная формула с высокой степенью точности отражает основные количественные закономерности процесса прессования металлических порошков при осевом и радиальном прессовании.

При выбранных системах нагружения можно воспользоваться и другими известными уравнениями. Важно только, чтобы они наиболее точно описывали процесс уплотнения порошка с учетом изменения плотности и структуры материала.

С учетом (10) и (11) окончательно получим:

$$\frac{3P^2 \left((1 - \xi_{рад})^2 \left(\frac{1+v}{1-v} \right)^{2n} - (1 - \xi_{ос})^2 \left(\frac{1+v}{1-v} \right)^{2m} \right) + T^2 \left((1 + 2\xi_{ос})^2 \left(\frac{1+v}{1-v} \right)^{2m} - (2 + \xi_{ин})^2 \left(\frac{1+v}{1-v} \right)^{2n} \right)}{\sigma_0 \left(\frac{1+v}{1-v} \right)^{2(m+n)} (1 - \xi_{рад} \xi_{ос}) (4\xi_{ос} - \xi_{рад} \xi_{ос} - 2\xi_{рад} - 1)} = 1.$$

Полученная модель пластичности учитывает эффект различия пределов текучести при растяжении и сжатии. Коэффициент бокового давления $\xi_{ос}$, определяемый при осевом прессовании в матрице, и коэффициент бокового давления $\xi_{ин}$, определяемый при радиальном прессовании, зависят от коэффициента межчастичного трения, а, значит, и материала порошка, формы и размеров частиц, плотности. Таким образом, появляется возможность комплексно учесть структурные изменения в процессе прессования.

На рис.2 показан след поверхности нагружения в координатах и порошка титана ПТК с относительной плотностью прессовки.

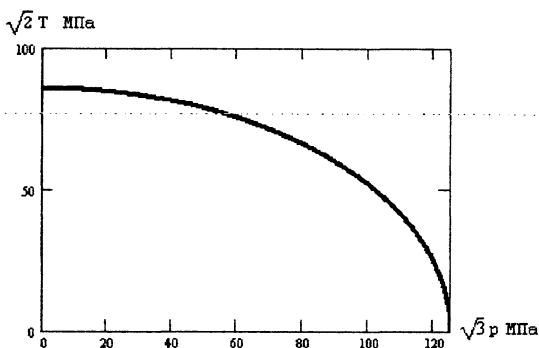


Рис. 2. След поверхности нагружения в плоскости ПТК, $\nu = 0.55$

Модель пластичности уплотняемого порошкового тела в виде эллипсоида вращения является многопараметрической. Она определяет связь компонент тензора напряжений с плотностью, структурными характеристиками прессовки и может служить основой для расчета основных схем уплотнения порошка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мидуков В.З., Рудь В.Д. О состоянии экспериментальных исследований пластических деформаций пористых металлов // Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов. — Киев: Наукова думка, 1985. — С. 62–67.
2. Реут О.П., Богинский Л.С., Петюшик Е.Е. Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов. — Минск: «Дэбор», 1998, — 258 с.
3. Штерн М.Б. Определяющие уравнения для уплотняемых пластичных пористых тел // Порошковая металлургия. — 1981. — № 4. — С. 17–23.