ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2001. Т. LIV, № 3.

УДК 621.762

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.С. ПЕТРОСЯН

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭКСТРУЗИЕЙ

В соответствии с теорией пластичности пористых тел осуществлена обработка результатов испытаний пористых композиционных материалов на одноосное сжатие. Построены диаграммы деформирования, на основе которых получено аналитическое решение задачи уплотнения пористого композиционного материала, армированного нитевидными волокнами. Располагая результатами испытаний пористых материалов, можно с большой точностью оценить механические свойства аналогичного компактного материала. *Ключевые слова:* теория пластичности, одноосное сжатие, композиции, диаграммы деформирования, металлические волокна.

Как известно [1, 2], выбор окончательной деформационной обработки композиционных материалов зависит не только от массы и геометрических размеров получаемых изделий из них, но и от механических свойств пористых заготовок, подвергаемых экструзии, а следовательно, от напряженно-деформированного состояния в процессе уплотнения.

В основу теории пластичности пористых сред положено условие, что пористая среда представляет собой структурно-некомпактное изотропное тело, включающее пустоты сферической формы [1]. В практике порошковой металлургии такое определение характерно для спеченных материалов с пористой структурой. В этой связи для анализа напряженно-деформированного состояния пористых материалов при сжатии используем теорию пластичности пористых тел, которая базируется на следующих зависимостях [3]:

$$\begin{split} \sigma_{_{\mathsf{3KB}}} &= \frac{1}{\beta^{n+0,5}} \left(\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} + 9\alpha^m \sigma_0^2 \right)^{1/2}, \\ & d\overline{\epsilon}_{_{\mathsf{3KB}}} = \beta^{2n-0,5} \left(\frac{2}{3} de_{ij} de_{ij} + \frac{d\epsilon_0^2}{\alpha^m} \right)^{1/2}, \end{split} \tag{1} \\ & d\epsilon_{ij} = \frac{3 d\overline{\epsilon}_{_{\mathsf{3KB}}}}{2\sigma_{_{\mathsf{3KB}}} \beta^{3n}} \left[\sigma_{ij} - (1 - 2\alpha^m) \delta_{ij} \sigma_0 \right], \\ & dv = \frac{9\alpha^m (1 - v) d\overline{\epsilon}_{_{\mathsf{3KB}}} \sigma_0}{\beta^{3n} \sigma_{_{\mathsf{3KB}}}}, \end{split}$$

где $\sigma_{_{3KB}}$ - эквивалентное напряжение; $d\overline{\epsilon}_{_{3KB}}$ - эквивалентное приращение пластической деформации; $de_{_{ij}}$, $d\epsilon_{_{ij}}$, $S_{_{ij}}$, $\sigma_{_{ij}}$ - соответственно компоненты девиаторов и тензоров приращений пластических деформаций и напряжений; $\sigma_0(\delta_{_{ij}}\sigma_{_{ij}})/3$ - среднее напряжение; $d\epsilon_0 = (\delta_{_{ij}}d\epsilon_{_{ij}})/3$ - приращение

средней деформации; δ_{ij} - символ Кронекера; m, n - параметры относительной пористости v; α, β - функции пористости, определяемые [1]:

$$\alpha = 1/4 \left[\frac{3(1 - v^{1/3})}{(3 - 2v^{1/4}) \ln v} \right]^2, \ \beta = \left[\frac{3(1 - v^{1/3})}{3 - 2v^{1/4}} \right]^2.$$
(2)

Определение параметров (m,n) и построение диаграммы деформирования [2] производится по результатам испытаний пористых цилиндрических образцов на одноосное сжатие (рис. 1). В этом случае главные напряжения: $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = -\sigma$, где $\sigma = P/F -$ осевое напряжение (давление прессования); P, F - соответственно текущая сжимающая сила и площадь поперечного сечения заготовки.

Следовательно, в случае одноосного напряженного состояния зависимости (1) примут вид

$$\sigma_{_{\mathsf{3KB}}} = \frac{\sqrt{1 + \alpha^m}}{\beta^{n+0,5}} \sigma, \qquad (3)$$

$$d\overline{\epsilon}_{_{\mathsf{ЭКВ}}} = \frac{\beta^{2n-0,5}}{\sqrt{1+\alpha^m}} d\varepsilon, \qquad (4)$$

$$dv = -\frac{3\alpha^{m}(1-v)}{1+\alpha^{m}}d\varepsilon, \qquad (5)$$

где d ϵ – приращение осевой пластической деформации; $\epsilon = \ln(h_0/h)$ - осевая пластическая деформация; h_0 , h - соответственно начальная и текущая высоты заготовок.

С использованием теории пластичности пористых тел обработаны результаты испытаний на одноосное сжатие и построены диаграммы деформирования (σ_{экв} – $\int d\overline{\epsilon}_{_{экв}}$), на основе которых получены приближенные решения процессов уплотнения пористых композиционных материалов в жестких матрицах.

Этим путем можно решать аналогичные технологические задачи, связанные с обработкой пористых материалов давлением, применяемые в практике порошковой металлургии.

Принятая методика получения пористых заготовок из армированных композиционных материалов заключалась в следующем. Шихту из смеси металлического порошка-матрицы и произвольно ориентированных дискретных волокон подвергали статическому прессованию, а затем спеканию в среде водорода. Таким образом, при температурах 900°*C* (<Cu – Mo>) и 1100°*C* (<Fe – сталь 55>, <Fe - Mo>) и продолжительности $\tau = 1,5$ ч получали спеченные пористые цилиндрические заготовки с $h_0/d_0 = 1,4$ ($d_0 = 10,2$ *мм*), которые испытывали на одноосное сжатие. По результатам испытаний построены диаграммы сжатия (рис. 1-4).



1 – 80; 2 – 40; 3 – 120; 1, 2, 3 – в координатах (σ – ϵ); 1', 2', 3' – в координатах (V – ϵ)

Из (5) видно, что на изменение пористости оказывает влияние только коэффициент m. Следовательно, экспериментально определяя кривую изменения пористости ($v-\epsilon$), по формуле (5) можно найти значения m. Для этого, зная начальную относительную пористость материала v_0 и приращение осевой пластической деформации d ϵ , а также задавая значения m ($0,05 \le m \le 1,5$) с шагом 0,05, по (5) строим семейство кривых ($v-\epsilon$). Взятый диапазон значений m обосновывается данными [1], где m = 1. Параметр пористости m находим из условия совпадения кривых ($v-\epsilon$), построенных (вычисленных) по (5), с соответствующими экспериментальными кривыми (рис. 1-4). Результаты обработки опытных данных на ЭВМ показали, что для всех исследуемых композиций m = 0,75 [4].

Параметр п определяли по методике [2]. Сущность ее заключается в следующем. Используя истинную диаграмму сжатия (σ - ϵ) заготовок с различной начальной пористостью и найденный параметр m = 0,75, а также задаваясь значениями n ($0,05 \le n \le 1,0$) с шагом 0,05, по формулам (3) и (4) вычисляли $\sigma_{_{3KB}}$ и $\int d\overline{\epsilon}_{_{3KB}}$ и строили семейство кривых ($\sigma_{_{3KB}} - \int d\overline{\epsilon}_{_{3KB}}$). Диаграмме деформирования материала соответствует

такое значение параметра n, при котором кривые деформирования заготовок с различной начальной пористостью совпадут друг с другом, т.е. в этом случае диаграмма деформирования не будет зависеть от пористости материала. Для композиции <Cu - Мо> получено n = 0,85, а для <Fe - Мо> и <Fe - сталь 55> n = 0,5 и 0,7.

Диаграммы сжатия в координатах (σ - ϵ), построенные по результатам испытаний пористых заготовок из исследуемых композиций, приведены на рис. 4 (кривые 1, 2). Как и следовало ожидать, для всех композиций кривые (σ - ϵ) с меньшей исходной пористостью (кривая 1) располагаются выше кривых с большей исходной пористостью (кривая 2). С уменьшением пористости заготовок кривые сжатия располагаются ближе к предельному уровню и стремятся к диаграмме деформирования (рис. 4, кривая 3) компактного материала, т.е. когда пористость стремится к нулю.

На рис. 1 и 4 показаны осредненные диаграммы сжатия (кривые 1, 2, 3) и обобщенные диаграммы деформирования для композиций <Cu - Mo> (рис. 2, 3), которые в пределе стремятся к кривым 4 и 5, отвечающим состоянию материала с нулевой пористостью. Это подтверждает пригодность теории пластичности пористых тел применительно к композиционным материалам, а также правильность поставленных нами экспериментов.





1, 2, 3, 4 - в координатах (σ - ϵ); 5 - в координатах ($\sigma_{_{\mathsf{ЭКВ}}} - \int d\overline{\epsilon}_{_{\mathsf{ЭКВ}}}$). 1 - ($v_0 = 0,25$); 2 - ($v_0 = 0,19$); 3 - ($v_0 = 0,16$); 4 - ($v_0 = 0,14$)



Рис.3. Диаграммы сжатия и деформирования композиционного материала (<Cu – Mo>), экструдированного при различных степенях обжатия:

$$\lambda$$
 =1,5 (1), 3,0 (2), 6,0 (3); n = 6 (1), 3 (2), 0% (3); t₃ = 840...860°C, β =60°, v_B=0,25, l₀/d₀ =30. 1, 2, 3 - в κ

оординатах
$$(\sigma - \varepsilon)$$
; 4 - в координатах $(\sigma_{_{ЭКВ}} - \int d\overline{\varepsilon}_{_{ЭКВ}})$



Рис.4. Диаграммы сжатия и деформирования композиционных материалов при различных исходных

пористостях:

a - <Fe - сталь 55>, vb=20 об.%; б - <Fe - Mo>, vb=20 об.%; b - <Cu - Mo>, vb = 25 об.%; vo: (a) 1 - 0,17; 2 - 0,22; (б) 1 - 0,2; 2 - 0,25; (b) 1 - 0,15, 2 - 0,25 Таким образом, экспериментально-теоретические исследования напряженнодеформированного состояния пористых тел при сжатии (рис. 1-4) показывают, что, располагая этими данными, а также результатами предварительных испытаний пористых материалов, можно с большой точностью оценить механические свойства аналогичного компактного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Грин Р.Дж. Теория пластичности пористых тел // В сб. Механика. 1973. ¹ 4. С. 109 120.
- 2. Копьев И.М., Овчинский А.С. Разрушение металлов, армированных волокнами. М.: Наука, 1977. 240 с.
- Петросян Г.Л., Петросян Х. Л., Погосян М. З. Методы построения диаграмм деформирования пористого материала испытанием плоских образцов // Порошковая металлургия. – 1979. - ¹11. - С. 69 – 74.
- Манукян Н.В., Петросян Г.Л., Минасян Б.Ц., Петросян А.С. Исследование напряженно-деформированного состояния пористых композиционных материалов при сжатии // Порошковая металлургия. – 1982. - ¹ 1. - С. 84 – 88.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 05.03.2001.

Հ.Ս. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ԷՔՍՏՐՈՒՉԻԱՅՈՎ ԱՄՐԱՑՎԱԾ ԿՈՄՊՈՉԻՑԻՈՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԴԵՖՈՐՄԱՑՄԱՆ ՄԵԽԱՆԻԿԱՆ

Ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության տեսության համաձայն կատարվել են ծակոտկեն կոմպոզիցիոն նյութերի միաառանցք սեղմման փորձարկումներ։ Կառուցվել են դեֆորմացման դիագրամներ, որոնց հիման վրա ստացվել է թելանման մետաղալարերով ամրանավորված ծակոտկեն կոմպոզիցիոն նյութերի ամրացման խնդրի վերլուծական լուծումը։ Հիմքում ունենալով ծակոտկեն նյութերի փորձարկումների արդյունքները, մեծ Ճշգրտությամբ կարելի է գնահատել համանման կոմպակտ նյութերի մեխանիկական հատկությունները։

H.S. PETROSSYAN

EXTRUDED COMPOSITE BODY DEFORMATION MECHANICS

In conformity with porous body plasticity theory, porous composites are tested in single-axis compression and test results are analysed. With the help of deformation diagrams, an analytical solution is found for the consolidation problem of metal-fibre reinforced porous composites. The porous material test results can make a basis for precise mechanical property evaluation of similar compact material.