05.1

Моделирование пластической деформации и разрушения пористых материалов

© В.В. Поляков, А.В. Егоров, А.А. Лепендин

Алтайский государственный университет, Барнаул
E-mail: polyakov@phys.dcn-asu.ru

В окончательной редакции 27 сентября 2004 г.

Проведено моделирование деформационного упрочнения пористого материала. Рассчитаны кривые деформационного упрочнения $\sigma - \varepsilon$, пределы прочности и предельные деформации при разрушении для железа с пористостью от 0 до 30%. Выявлены аномалии в поведении указанных характеристик при пористостях, соответствующих перколяционному переходу от изолированных пор к „бесконечному“ поровому кластеру. Показана адекватность предложенной модели экспериментальным данным.

Пластическая деформация и разрушение материалов с резко неоднородной структурой характеризуются специфическими особенностями и являются недостаточно изученными. Особый интерес представляет исследование пористых материалов, которые могут рассматриваться как гетерофазные среды с предельно различающимися свойствами фаз (твердого каркаса и пор) [1]. Деформационное поведение таких материалов определяется действием специфических физических механизмов [2]. Моделирование этих механизмов позволяет выявить зависимости прочностных и пластических свойств от пористости. В настоящей работе предлагается теоретическая модель, описывающая влияние пористости на деформационное упрочнение и разрушение металлических материалов при растяжении.

Рассматривавшийся материал характеризовался величиной пористости P, вводившейся как интегральная доля пустот. Для описания влияния пористости на кривые деформационного упрочнения $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ учитывались вклады от двух механизмов. Первый механизм обусловлен геометрическим разупрочнением при деформировании компактных участков пористого тела в связи с наличием пустот, приводящим к уменьшению эффективного сечения образца по сравнению с компактным сечением. Второй механизм связан с ростом и распространением микротрещин от основных концентраторов напряжений, в качестве которых в пористом теле также выступают поры. В соответствии с этим полная деформация материала записывалась в виде

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2, \tag{1}$$

где ε_1 и ε_2 — вклады от первого и второго механизмов соответственно. Кривая деформационного упрочнения для компактного материала $\sigma_k = \sigma_k(\varepsilon_k)$ (здесь σ_k и ε_k — соответственно напряжения и деформации при $P = 0$) считалась известной.

Разупрочнение материала, обусловленное действием первого механизма, проявлялось в том, что в образце с поперечным сечением S напряжение σ распределялось только по компактному каркасу с эффективным сечением S_K. Это позволяло записать приложенную к образцу силу в виде $\sigma S = \sigma_K S_K$ и далее найти

$$\sigma = \sigma_K \frac{S_K}{S}. \tag{2}$$

Отношение сечений S_K/S может быть найдено с помощью геометрических моделей пористой среды [3]. Для построения этих моделей принципиальным является изменение топологической картины структуры, проявляющееся в образовании из изолированных пор „бесконечного" кластера при значениях пористости, соответствующих порогу перколяции P_0 [4]. При этом доля закрытой пористости для заданных значений P оценивалась коэффициентом α:

$$\alpha = \begin{cases} 1, & P \leqslant P_0, \\ 0, & P > P_0. \end{cases} \tag{3}$$

В рамках метода элементарной ячейки величина S_K/S во всем интервале изменения пористости записывалась в виде [3]

$$\frac{S_K}{S} = \alpha(1 - f_1^2) + (1 - \alpha)(1 - f_2^2), \tag{4}$$

где первое слагаемое описывало случай малой пористости ($P \leqslant P_0$), а второе — случай высокой пористости, превосходящей порог перколяции ($P > P_0$). Величины f_1 и f_2 для элементарных ячеек с кубической симметрией выражались через P согласно соотношениям

$$f_1^3 = P, \qquad 3f_2^2 - 2f_2^3 = P. \tag{5}$$

Формулы (2) и (4) позволили по известной зависимости $\sigma_k = \sigma_k(\varepsilon_k)$ определить напряжения σ в пористом материале, соответствующие заданным значениям деформации $\varepsilon_1 = \varepsilon_K$.

Вклад в разупрочнение второго механизма, обусловленного возникновением микротрещин, моделировался следующим образом. Деформация ε_2 выражалась как отношение величины δ раскрытия трещины к среднему расстоянию h между соседними порами (соответствующему размеру „бруса“ твердого каркаса в модели элементарной ячейки):

$$\varepsilon_2 = \frac{\delta}{h}. \tag{6}$$

Раскрытие трещины δ связано с коэффициентом интенсивности напряжений K_I соотношением [5,6]:

$$\delta = \frac{cK_I^2}{E_K \sigma_{TK}}, \tag{7}$$

где E_K и σ_{TK} — модуль Юнга и предел текучести компактного материала соответственно, c — множитель порядка единицы, учитывающий наличие пластической зоны. Коэффициент интенсивности напряжений в компактной области пористого материала выражался через длину трещины l как

$$K_I = \sigma_k \sqrt{\pi l} = \sigma_k \sqrt{\pi (l_0 + \Delta l)}. \tag{8}$$

Здесь l_0 — начальный размер трещины, Δl — увеличение длины трещины при изменении K_I от значения K_{I0}, при котором начиналось развитие трещины, до текущего значения, соответствовавшего напряжению σ. Для величины Δl, согласно [5], можно использовать выражение

$$\Delta l = d \cdot \left(\ln \frac{K_C^2 - K_{I0}^2}{K_C^2 - K_I^2} - \frac{K_I^2 - K_{I0}^2}{K_C^2} \right), \tag{9}$$

полученное в приближении хрупкого разрушения и субкритического роста трещин. Здесь K_C — критическое значение K_I, соответствующее разрушению; d — параметр, зависящий от особенностей развития трещины в конкретном материале. Формулы (8) и (9) позволили для данных значений напряжения σ в компактной части пористого материала рассчитать (как неявную функцию) коэффициенты интенсивности напряжений K_I и далее найти по (6) дополнительную деформацию ε_2.

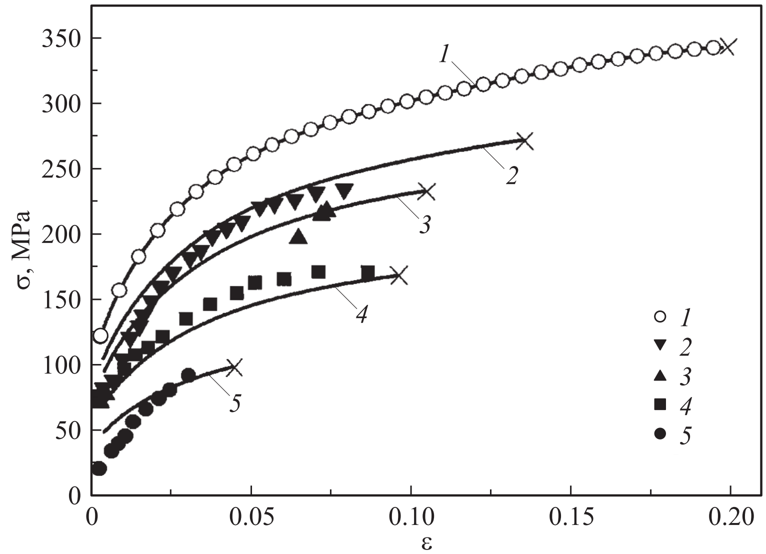

Рис. 1. Кривые деформационного упрочнения пористого железа. Пористость: *1* — $P = 0$; *2* — $P = 0.05$; *3* — $P = 0.1$; *4* — $P = 0.15$; *5* — $P = 0.3$.

Кривые деформационного упрочнения рассчитывались до предельных значений σ_B и ε_B, соответствовавших разрушению в результате действия какого-либо из двух механизмов. Эти значения находились по условиям, следовавшим из формул (2) и (6).

Расчеты были проведены для случая железа с пористостью P от 0 до 0.3. В качестве значений K_C, K_{I0}, d использовались экспериментальные характеристики для компактного армко-железа. Исходная кривая деформационного упрочнения для случая $P = 0$ находилась из испытаний на растяжение образцов этого же материала. Параметры l_0 и h определялись для пористого материала экспериментально, для порога перколяции использовали $P_0 = 0.1$. Результаты расчетов представлялись в виде кривых $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ для разных значений P и в виде зависимостей величин σ_B и ε_B от пористости.

На рис. 1 приведены рассчитанные кривые деформационного упрочнения железа при различных пористостях (*1* — $P = 0$, аппроксимация экспериментальных данных; *2* — $P = 0.05$; *3* — $P = 0.1$; *4* — $P = 0.15$;

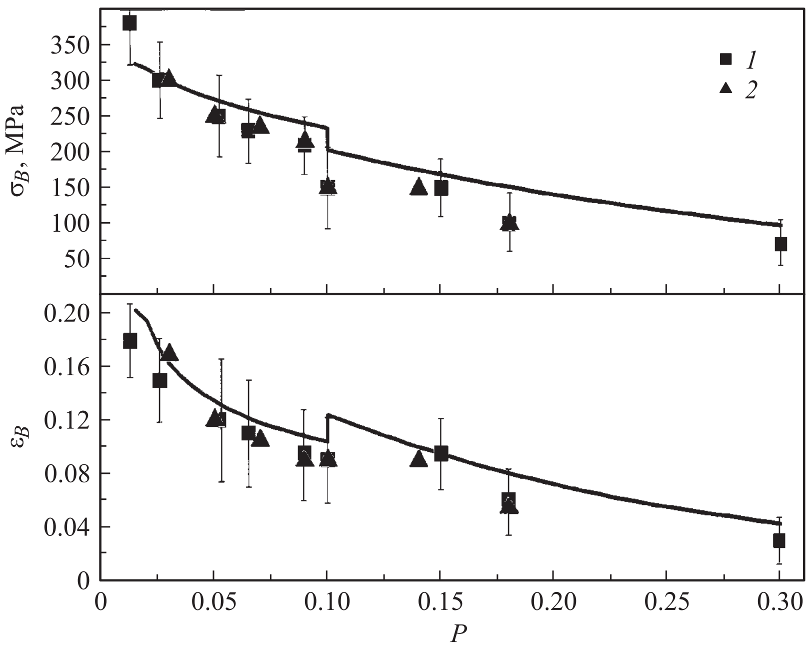

Рис. 2. Предел прочности и предельная деформация пористого железа. Эксперимент: *1* — настоящая работа, *2* — из [7].

5 — $P = 0.3$ — расчет). Как видно из рис. 1, кривые деформационного упрочнения монотонны на всем протяжении. Основной особенностью кривых $\sigma - \varepsilon$ является быстрое снижение наклона с ростом пористости, т. е. имеет место вызванное разупрочнением уменьшение сопротивления материала деформированию.

На рис. 2 представлены предельные значения σ_B и ε_B (соответствующие точки на рис. 1 отмечены крестиками). Из рис. 2 видно, что для предельной деформации ε_B наблюдается нарушение монотонного спада при росте пористости, выражающееся в аномалии при $P \sim 0.1$. Аналогичная особенность в более слабой форме проявляется для предельной прочности σ_B. Выявленные аномалии связаны с учетом перколяционного перехода от изолированных пор к „бесконечному“ поровому кластеру.

Для сопоставления с опытом были проведены измерения на образцах, изготовленных из железного порошка, распыленного в воздухе (ПЖРВ2), путем прессования до заданной пористости и последующего спекания в вакууме при температуре 1500 K в течение 2.5 h. Образцы имели стандартную форму для испытаний на растяжение с прямоугольной рабочей частью сечением 3×3 mm, пористость образцов изменялась в пределах от $P = 0$ до $P = 0.3$. Из испытаний на растяжение определялись кривые деформационного упрочнения в координатах „напряжение σ–деформация ε". Полученные экспериментальные данные для конкретных образцов приведены на рис. 1 в виде точек, на рис. 2 представлены опытные значения, усредненные по $10-12$ образцам с данной пористостью. Наблюдаемый разброс экспериментальных точек обусловлен неоднородностью структуры пористых образцов. На рис. 2 нанесены также результаты измерений, взятые для сравнения из [7].

Как видно из рис. 1 и 2, рассчитанные кривые близки к соответствующим экспериментальным точкам. Это свидетельствует о надежности развитого модельного описания и его адекватности для прогнозирования деформационного поведения пористых материалов. Экспериментальные данные подтверждают также вывод о наличии особенностей в зависимостях предельных характеристик металлов от пористости. Предложенная модель дает возможность провести физическую интерпретацию этих аномалий, а именно связать их с перколяционным переходом в пористом материале.

Список литературы

[1] *Дульнев Г.Н., Новиков В.В.* Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 248 с.

[2] *Поляков В.В., Егоров А.В., Свистун И.Н.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 22. С. 14–18.

[3] *Поляков В.В., Головин А.В.* // Изв. АН. Металлы. 1995. № 4. С. 81–85.

[4] *Шкловский Б.И., Эфрос А.Л.* // УФН. 1975. Т. 117. В. 3. С. 401–435.

[5] *Андрейкин А.Е., Лысак Н.В.* Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. Киев: Наук. думка, 1989. 176 с.

[6] *Партон В.З., Мороз Е.М.* Механика упругопластического разрушения. М.: Наука, 1985. 504 с.

[7] *Баньковский О.И., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П., Щербань Н.И.* // Порошковая металлургия. 1988. № 6. С. 94–100.