

05.1

Пластичность нанокристаллических материалов с бимодальной зеренной структурой

© В.А. Поздняков

ГНЦ ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, Москва
E-mail: Pozdnyakov.home@tochka.ru*Поступило в Редакцию 10 апреля 2007 г.*

Развита простая модель деформационного поведения наноструктурного материала со смешанной нано- и микрокристаллической зеренной структурой. Нанозеренная матрица такого материала обеспечивает высокую прочность, а зеренная структура микромасштабного уровня приводит к повышению пластичности. Из модели следует зависимость однородной деформации до образования шейки при растяжении наноструктурного материала с двухмасштабной наномикрокристаллической структурой от размеров зерен и объемных долей структурных компонентов. Показано, что увеличение однородной деформации обусловлено повышением значений отношения предела текучести к коэффициенту деформационного упрочнения и коэффициента распределения пластической деформации между нано- и микроструктурными составляющими.

PACS: 62.20.Fc, 81.07.Bc

Прочность наноструктурных материалов (НМ) при растяжении существенно превышает прочность крупнозернистых аналогов, но, как правило, наноматериалы обнаруживают весьма низкую пластичность [1–6]. Низкий уровень пластичности обусловлен размерным ограничением процессов генерации и движения дислокаций в нанозернах.

Высокая пластичность наблюдалась для нанокристаллической меди с бимодальным распределением зерен по размерам [7]. Наноструктурная медь синтезирована методом „криопротекции“ (ниже 77 К) с последующим нагревом до 450 К. В результате получена бимодальная структура, состоящая из микрочастиц (объем фракции до 25%), погруженных в матрицу наночастиц [7]. В этом НМ объединены высокая прочность с пластичностью. Предполагается, что наночастицы обеспечивают проч-

ность материала, а включенные микрзерна стабилизируют деформацию растяжения.

Характерные особенности деформационного поведения НМ — высокий, по сравнению с микрокристаллическими материалами, предел текучести, высокое деформационное упрочнение на начальной стадии пластической деформации при пластической деформации ε_p меньше некоторого критического значения $\varepsilon_p^*(D)$, зависящего от размера зерна D , $\varepsilon_p \leq \varepsilon_p^*(D)$, и низкое деформационное упрочнение с возможным выходом на насыщение деформационной кривой при $\varepsilon_p > \varepsilon_p^*(D)$ [1–4]. Для некоторых наноструктурных состояний как $\varepsilon_p^* \rightarrow 0$, так и величина коэффициента упрочнения $\theta = \partial\sigma/\partial\varepsilon \rightarrow 0$ и деформационное поведение НМ приближается к идеально пластическому [5].

Проведем анализ деформационного поведения при растяжении наноструктурного материала со смешанной нано- и микрокристаллической зеренной структурой. В ряде моделей деформационного поведения НМ [8–11] следует наличие двух или нескольких деформационных областей доминирования различных структурных механизмов пластического течения НМ. Если начальное упрочнение НМ обусловлено увеличением плотности дислокаций ρ , генерируемых в границах зерен, длина свободного пробега которых ограничена размерами зерен, то $d\rho \sim d\varepsilon_p/bD$, где b — величина вектора Бюргерса. Это приводит к параболическому деформационному упрочнению НМ на начальной стадии деформации [9,10].

Аппроксимируем кривую упрочнения НМ двумя ветвями:

$$\sigma(\varepsilon_p) = \begin{cases} \sigma_y + k_1\varepsilon_p^{1/2}, & \varepsilon_p \leq \varepsilon_p^*, \\ \sigma_y^* + k_2(\varepsilon_p - \varepsilon_p^*)^{1/2}, & \varepsilon_p > \varepsilon_p^*, \end{cases} \quad (1)$$

где σ_y — предел текучести, k_i — параметры деформационного упрочнения ($k_2 < k_1$), $\sigma_y^* = k_1(\varepsilon_p^*)^{1/2}$.

Важными механическими характеристиками материала являются временное сопротивление разрыву и однородная деформация до образования шейки. При испытании на растяжение с постоянной скоростью деформации приложенная к образцу деформирующая сила F в процессе деформации вначале увеличивается и проходит через максимум. Предел прочности (временное сопротивление разрыву) σ_r соответствует напряжению в тот момент, когда нагрузка F на кривой $F-\varepsilon_p$ достигает

наибольшего значения. Соответственно условием достижения временного сопротивления разрыву является $dF/d\varepsilon_p = 0$, достигаемое при деформации ε_t .

Рассмотрим зависимость величины однородной деформации ε_t от структурных параметров материала. Временное сопротивление σ_t соответствует достижению максимума на деформационной кривой. Если напряжение течения слабо зависит от скорости деформирования, то условие максимума, как в [12], имеет вид

$$\sigma = (\partial\sigma/\partial\varepsilon)_{\sigma=\sigma_t}. \quad (2)$$

Для материала с деформационной кривой степенного вида $\sigma(\varepsilon) = \sigma_y + k_n\varepsilon^n$ однородная пластическая деформация ε_t , соответствующая напряжению σ_t , определяется из уравнения

$$\varepsilon_t^n - n\varepsilon_t^{n-1} + \sigma_y k_n^{-1} = 0. \quad (3)$$

Для параболической σ - ε -кривой, определяемой первым выражением (1), однородная пластическая деформация равна

$$\varepsilon_t = 0.5(Q^2 + 1) - 0.5Q[(Q^2 + 2)]^{1/2}, \quad (4)$$

где введено обозначение $Q = \sigma_y/k_1$.

Величина однородной деформации понижается с увеличением параметра Q , т.е. при данном значении предела текучести σ_y чем выше коэффициент деформационного упрочнения k_1 , тем более устойчиво пластическое течение, при котором достигается более высокое значение. Временное сопротивление σ_t определяется из (1) при $\varepsilon_p = \varepsilon_t$.

При переходе ко второй, квазилинейной стадии деформационного упрочнения (при $\varepsilon_p > \varepsilon_p^*$) устойчивость пластического течения при $k_2 \leq \sigma_y$ нарушается, так как $(\varepsilon_t - \varepsilon_p^*) \sim (1 - \sigma_y/k_2)$.

Актуальным является выяснение зависимости пластичности НМ с бимодальной зеренной структурой от параметров структуры. Проведем анализ деформационного поведения НМ, структура которого представляет собой матрицу нанозерен со средним размером D_n (наноскопических зерен меньшего масштабного уровня), содержащую объемную долю f субмикроструктурных зерен (наноскопических зерен большего масштабного уровня) со средним размером D_μ . Параметры деформационного поведения нано- и субмикроструктурной

структурных составляющих значительно различаются, и такой материал со смешанной наномикроструктурной структурой можно рассматривать как „двухфазный“. На первой стадии пластического течения двухфазного материала в более мягкой составляющей возникает пластическая деформация, а жесткая деформируется упруго. Далее начинается пластическая деформация более жесткой структуры.

Обозначим величину пластической деформации субмикроструктурных (более высокого масштабного уровня) зерен $\varepsilon_{p\mu}$, а нанокристаллической матрицы — ε_{pn} . Общая пластическая деформация НМ:

$$\varepsilon_p = (1 - f)\varepsilon_{pn} + f\varepsilon_{p\mu}. \quad (5)$$

Аналогичное соотношение выполняется для напряжений σ в зернах разных масштабов:

$$\sigma(\varepsilon_p) = (1 - f)\sigma_n(\varepsilon_{pn}) + f\sigma_\mu(\varepsilon_{p\mu}). \quad (6)$$

Обобщенное правило смесей для гетерофазного материала определяется соотношениями (5) и (6) [12]. Воспользуемся показателем неравномерности распределения пластической деформации между структурными составляющими $m = \varepsilon_{p\mu}/\varepsilon_{pn}$.

Кривые деформационного поведения микро- и наноструктурных составляющих описываются соотношениями

$$\sigma_\mu(\varepsilon_{p\mu}) = \sigma_{y\mu} + k_{1\mu}(\varepsilon_{p\mu})^{1/2}, \quad (7)$$

$$\sigma_n(\varepsilon_{pn}) = \sigma_{yn} + k_{1n}(\varepsilon_{pn}^*)^{1/2} + k_{2n}(\varepsilon_{pn})^{1/2}. \quad (8)$$

В приближении постоянства параметра m в ходе деформации для σ – ε -кривой НМ со смешанной наномикрозеренной структурой получается следующее соотношение:

$$\begin{aligned} \sigma(\varepsilon_p) = (1 - f) \left[\sigma_{yn}^* + k_{2n} \left(\frac{\varepsilon_p}{1 - f + mf} \right)^{1/2} \right] \\ + f \left[\sigma_{y\mu} + k_{1\mu} \left(\frac{m\varepsilon_p}{1 - f + mf} \right)^{1/2} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

где f — объемная доля субмикроструктурных зерен.

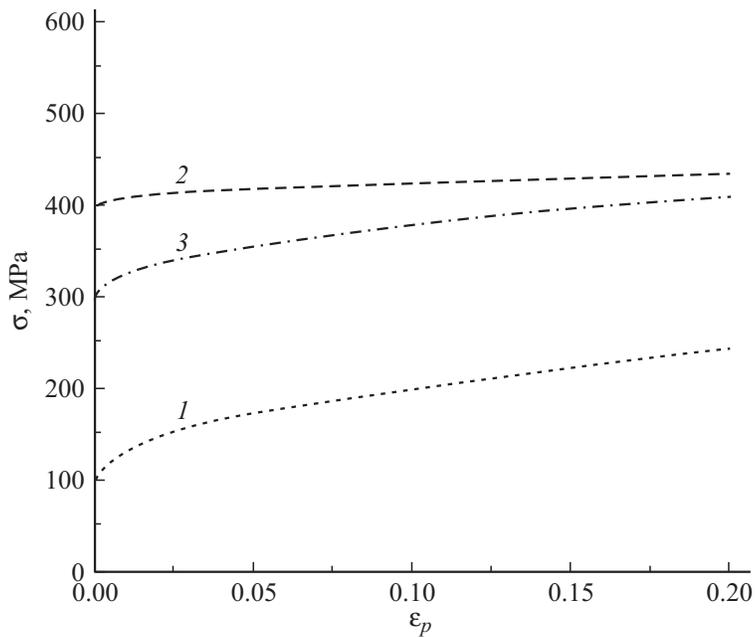


Рис. 1. Графики σ - ε -кривых чистой меди со структурами: 1 — субмикросталлической ($D_\mu = 100$ nm); 2 — нанокристаллической ($D_n = 15$ nm); 3 — НМ с двухмасштабной структурой ($D_n = 15$ nm, $D_\mu = 100$ nm, $f = 0.3$).

Предел текучести НМ с двухмасштабной структурой с учетом зависимости Холла–Петча для предела текучести σ_y : $\sigma_y = \sigma_0 + K_i D^{-1/2}$, где σ_0 , K_i — параметры материала, равен:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= f\sigma_{y\mu} + (1-f)\sigma_{yn} \\ &= f(\sigma_{y\mu 0} + K_\mu D^{-1/2}) + (1-f)(\sigma_{yn 0} + K_n D^{-1/2}). \end{aligned} \quad (10)$$

На рис. 1 показаны графики σ - ε -кривых субмикро- и нанокристаллического материалов и НМ с двухмасштабной наносубмикросталлической структурой. Для примера выбрана медь. Предел текучести нанокристаллической меди с $D \approx 10$ nm составляет 400 МПа [7]. Параметры упрочнения структурных составляющих НМ с двухмас-

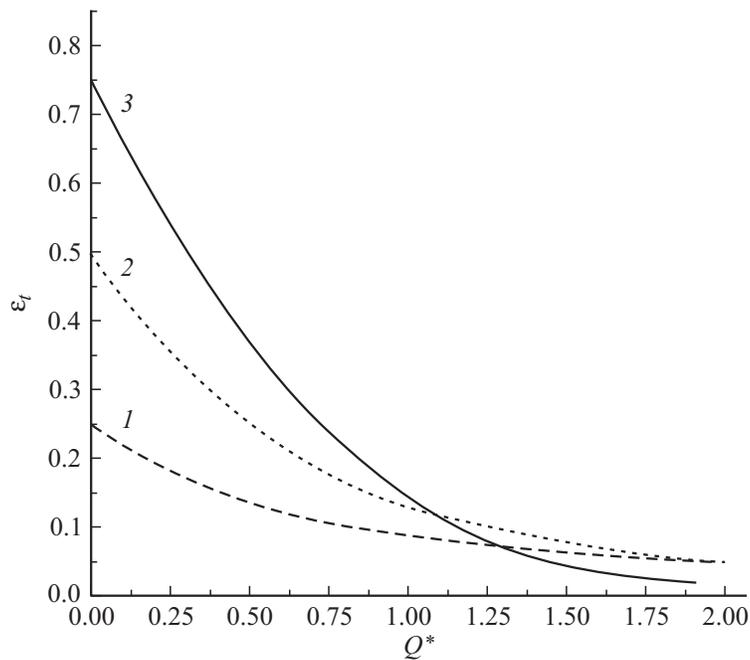


Рис. 2. Зависимость однородной деформации ε_t от параметра структурного состояния Q^* для $n = 0.25$ (1), $n = 0.5$ (2), $n = 0.75$ (3).

штабной структурой: $\sigma_{y,n} = 400$ МПа, $k_n = 50$ МПа, $\sigma_{y,\mu} = 100$ МПа, $k_\mu = 200$ МПа, $f = 0.3$.

Условие потери устойчивости пластического течения и величина ε_t в общем случае определяются численным решением уравнений (3), (7)–(10). Приближенное выражение для ε_t выражается соотношением (4) с новым параметром Q : $Q^* = \sigma_y/k_{ef}$, где

$$k_{ef} = \frac{fk_{1\mu} + (1-f)k_{2n}m}{[f + (1-f)m]^{1/2}}.$$

На рис. 2 приведен график зависимости ε_t от Q^* при $n = 0.25$ (кривая 1), $n = 0.5$ (кривая 2), $n = 0.75$ (кривая 3).

Величина деформации до разрушения (сумма однородной и неоднородной деформации) НМ с размером зерна $D \approx 10$ нм при комнатной температуре составляет несколько процентов ($\varepsilon_{t,n} \leq 1\%$). Предел текучести НМ с нанокристаллической матрицей со средним размером зерен $D_n = 25$ нм и пределом текучести $\sigma_{y,n} = 400$ МПа, с суб-микрокристаллическими зёрнами со средним размером $D_\mu = 100$ нм, пределом текучести $\sigma_{y,\mu} = 200$ МПа и $k_\mu = 180$ МПа при $f = 0.1$ равен $\sigma_y = 380$ МПа, $k_{ef} = 65$ МПа ($m = 1$), что дает $\varepsilon_t = 1.8\%$, и $k_{ef} = 150$ МПа ($m = 10$), $\varepsilon_t = 3.9\%$, а при $f = 0.3$ $\sigma_y = 340$ МПа, $k_{ef} = 95$ МПа ($m = 1$), $\varepsilon_t = 2.7\%$, и $k_{ef} = 165$ МПа ($m = 10$), $\varepsilon_t = 6.2\%$.

Для увеличения пластичности НМ с многомасштабной зеренной структурой требуется повышать эффективный коэффициент деформационного упрочнения и коэффициент распределения пластической деформации между структурными составляющими.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 06-08-00395) и Фонда ОАО „ММК“, ИТЦ „Аусфер“, ФНИО „Интелс“ (гранты 38-06-03 и 39-06-03).

Список литературы

- [1] Koch C.C., Morris D.G., Lu K., Inoue A. // Mater. Res. Soc. Bull. 1999. V. 24. P. 54–58.
- [2] Андриевский Р.А., Глезер А.М. // ФММ. 2000. Т. 89. № 1. С. 91–112.
- [3] Weertman J.R., Farkas D., Hemker K., Kung H., Mayo M., Mitra R., Van Swygenhoven H. // MRS Bulletin. 1999. V. 24. N 2. P. 44–50.
- [4] Cheng S., Ma E., Wang Y.M., Kecskes L.J. et al. // Acta Mater. 2005. V. 53. P. 1521.
- [5] Champion Y., Langlois C., Guerin-Maily S., Langlois P., Bonmentein J.L., Hytch M.J. // Science. 2003. V. 300. P. 310–311.
- [6] Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Zhu Y.T., Lowe T.C. // J. Mater. Res. 2002. V. 17. P. 5–8.
- [7] Wang Y., Chen M., Zhou F., Ma E. // Letters to Nature. 2002. V. 419. P. 912–914.
- [8] Поздняков В.А., Глезер М.А. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. С. 31–36.
- [9] Поздняков В.А. // ФММ. 2003. Т. 96. № 1. С. 114–128.
- [10] Малыгин Г.А. // ФТТ. 1995. Т. 37. № 8. С. 2281–2292.
- [11] Гуткин М.Ю., Овидько И.А. Дефекты и механизмы пластичности в наноструктурных и некристаллических материалах. СПб.: Янус, 2001. 180 с.
- [12] Hart F.W. // Acta Met. 1967. V. 15. N 2. P. 351–355.