

РАЗДЕЛ II ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 539.5

Бейгельзимер Я. Е.
Прокофьева О. В.
Кулагин Р. Ю.

ПЛАСТИЧНОСТЬ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

По определению пластичность – это способность материала пластически деформироваться до разрушения. Количественной мерой пластичности является степень деформации, которую материал может накопить до разрушения. Она зависит как от самого материала, так и от условий деформации: температуры, давления, схемы напряженного состояния и т. д. В обработке металлов давлением уже достаточно давно введены параметры пластичности, которые базируются на предельных значениях эквивалентной деформации e_u , накапливаемой материалом до разрушения при различных схемах нагружения [1, 2].

Из стандартных параметров, принятых в материаловедении и машиностроении, для крупнокристаллических материалов используют относительное удлинение до разрыва δ и относительное сужение в шейке образца ψ . Величина равномерного удлинения до образования шейки δ_p не является характеристикой пластичности потому, что не связана с разрушением материала [3]. Она характеризует момент потери устойчивости конструкций и определяется интенсивностью деформационного упрочнения материала. Малая интенсивность упрочнения и, следовательно, малое δ_p , приводят к локализации деформации после которой, в ряде случаев, довольно быстро следует разрушение образца. По этой причине величину равномерного удлинения иногда ошибочно связывают с пластичностью.

Для оценки величины пластичности крупнокристаллических материалов в равной степени могут использоваться параметры ψ и δ . Различие между ними становится существенным, когда речь заходит о СМК металлах, получаемых методами ИПД. Такие материалы, благодаря своим структурным особенностям, обладают повышенной пластичностью, чем и привлекают к себе внимание многих исследователей. Поэтому особую актуальность приобретает вопрос корректности используемой меры пластичности при анализе экспериментальных данных. Невнимание к этому вопросу привело к возникновению неоднозначной ситуации вокруг пластических свойств СМК материалов, с которой можно столкнуться сейчас в публикациях по ИПД.

Целью данной работы является выявление корректной меры пластичности для нано- и СМК материалов, определяемой в испытаниях на растяжение.

Рассмотрим растяжение стандартного образца круглого сечения как двухстадийный процесс. На первой стадии происходит равномерная деформация, на второй – деформация сосредоточена в области шейки. В первом приближении примем, что шейка имеет форму, образованную двумя равными усеченными конусами, состыкованными по меньшим основаниям (см. рис. 1). Суммарный объем этих конусов равен объему цилиндра, представляющего собой область формирования шейки на рис. 1, б. Приравняв их, получим соотношение (обозначения приведены на рис. 1):

$$\frac{\ln}{\ln_0} = \frac{3}{1 + \frac{Dn}{Dn_0} + \left(\frac{Dn}{Dn_0}\right)^2}. \quad (1)$$

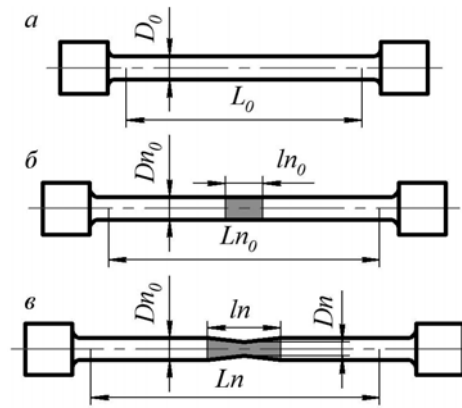


Рис. 1. Схема растяжения образца:

а – исходное состояние; б – конец первой и начало второй стадии растяжения (серым цветом показана область формирования шейки); в – вторая стадия растяжения (буквой L обозначена длина рабочей части образца, индекс n обозначает стадию растяжения с шейкой)

Из рис. 1 следует, что $L_n = L_{n_0} + l_n - l_{n_0}$, тогда на основании (1) получаем следующее выражение для величины относительного удлинения образца до разрыва:

$$\delta = \frac{L_n - L_0}{L_0} = \delta_p + \frac{l_{n_0}}{L_0} \left(\frac{3}{1 + \frac{D_n}{D_{n_0}} + \left(\frac{D_n}{D_{n_0}} \right)^2} - 1 \right), \quad (2)$$

где $\delta_p = \frac{L_{n_0} - L_0}{L_0}$ – равномерное удлинение образца до образования шейки.

Используя условие сохранения объема металла при деформации, из которого следует:

$$\frac{D_0}{D_{n_0}} = \sqrt{1 + \delta_p}, \quad (3)$$

а также определение относительного сужения в шейке в момент разрыва:

$$\psi = \frac{D_0^2 - D_{n_f}^2}{D_0^2}, \quad (4)$$

где D_{n_f} – диаметр наименьшего сечения шейки в момент разрушения, можно получить следующее соотношение связи между стандартными параметрами на растяжение:

$$\delta = \delta_p + \frac{l_{n_0}}{L_0} \left(\frac{3}{1 + \sqrt{1 - \psi} \sqrt{1 + \delta_p} + (1 - \psi)(1 + \delta_p)} - 1 \right). \quad (5)$$

Соотношение (5) показывает, что δ включает в себя два слагаемых. Первое из них (δ_p) определяется лишь показателем степени в законе деформационного упрочнения материала, а второе, кроме того, зависит еще и от ψ , т. е. от пластических свойств материала. Для металлов в СМК состоянии характерна малая интенсивность деформационного упрочнения, что приводит к значениям δ_p гораздо меньшим, чем в крупнокристаллическом состоянии. При этом оказывается, что даже возможное увеличение пластичности по показателю ψ , которое приводит к увеличению второго слагаемого, не спасает ситуацию, и величина δ

в СМК состоянии значительно меньше, чем в крупнокристаллическом. Это иллюстрирует рис. 2, на котором приведены графики зависимости δ от ψ при разных значениях δ_p . В расчетах принято $\ln_0/L_0 = 0,2$, что по порядку величины соответствует экспериментам для десятикратных образцов.

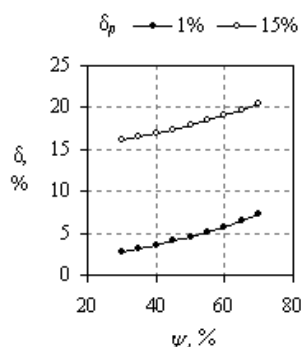


Рис. 2. Графики зависимости δ от ψ при разных значениях δ_p

На основании приведенного анализа можно сделать вывод о том, что параметр δ не отражает свойство пластичности СМК материалов, так как в значительной степени определяется малой интенсивностью их деформационного упрочнения.

В отличие от δ , параметр ψ отражает именно пластические свойства металлов, что можно показать следующим образом. При одноосном растяжении цилиндрического образца, величина e_u для момента разрушения, в наименьшем сечении шейки, определяется по формуле:

$$e_u = \ln \left(\frac{D_0}{Dn_f} \right)^2 = -\ln(1-\psi). \quad (6)$$

Это соотношение показывает, что величина ψ однозначно определяет эквивалентную деформацию, которую материал может накопить до разрушения, т. е. является мерой пластичности. Заметим, что в области шейки реализуется сложное трёхосное напряженное состояние, которое относится к классу жестких [1, 2]. Таким образом, ψ является мерой пластичности материала в области жестких напряженных состояний.

Экспериментальные исследования проводили на заготовках из технического чистого титана ВТ1-0. Выбор этого материала связан с тем, что при наличии комплекса повышенных механических свойств, он имеет большие перспективы практического применения. Для обработки методом ВЭ [4] из горячекатаного прутка изготавливали заготовки длиной 80 мм и формой поперечного сечения в виде прямоугольника с округлыми малыми сторонами и размерами 18×28 мм (см. рис. 3). Деформирование заготовок осуществлялось при температуре 300°C и противодавлении 200 МПа. Использовалась винтовая матрица с углом ската винтовой линии 50° . После определенного числа проходов ВЭ из заготовки вырезались стандартные образцы на растяжение, номинальным диаметром 5 мм. Схема вырезки образцов показана на рис. 3. За один проход эквивалентная деформация в областях вырезки образцов составляла 1,0.

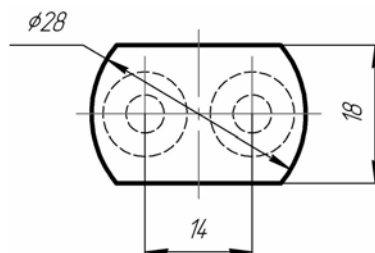


Рис. 3. Схема поперечного сечения заготовки и вырезки образцов на растяжение

На рис. 4 приведены результаты испытаний образцов на растяжение в виде графиков зависимости δ , δ_p и ψ от величины деформации, накопленной при ВЭ. Видно, что изменение пластичности сплава ВТ1-0 по показателю ψ имеет немонотонный характер. Снижение этого параметра на первых проходах ВЭ в последующем сменяется интенсивным повышением вплоть до значений, превышающих исходное (крупнокристаллический титан). При этом эффект повышения пластичности практически не индексируется показателем δ из-за значительного уменьшения интенсивности деформационного упрочнения и, связанного с этим, падения δ_p (рис. 4, а, б). Приведенные данные иллюстрируют сделанный выше вывод о некорректности использования δ в качестве показателя пластичности для СМК материалов.

В работе [4] показано, что после третьего прохода ВЭ, в титане ВТ1-0 формируется СМК структура, которая, с нашей точки зрения, является основной причиной повышенных пластических свойств материала. Этот эффект, по-видимому, связан с появлением новых путей релаксации внутренних напряжений, например, зернограницное проскальзывание [5].

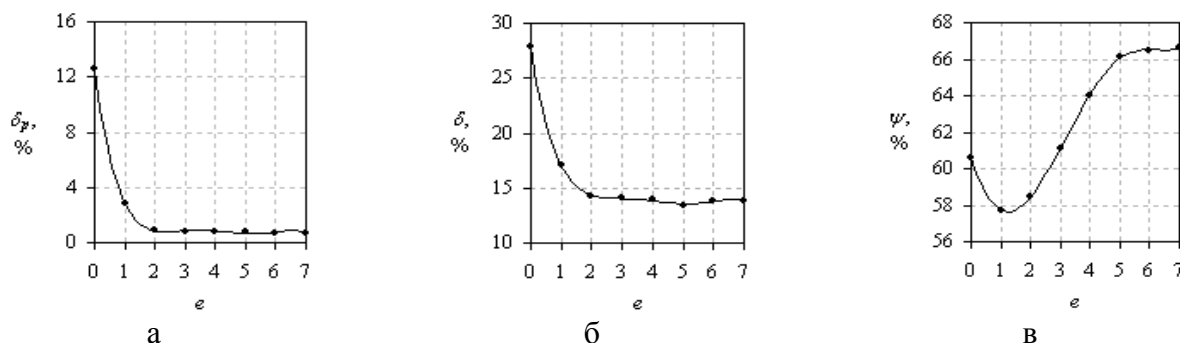


Рис. 4. Зависимости равномерного удлинения (а), относительного удлинения до разрушения (б), относительного сужения (в) от величины деформации при ВЭ для сплава ВТ1-0

ВЫВОДЫ

Пластичность СМК материалов корректно отражает параметр ψ , в отличие от δ , так как последний в значительной степени определяется малой интенсивностью их деформационного упрочнения.

Испытания на растяжение сплава ВТ1-0, в котором методом ВЭ была сформирована СМК структура, свидетельствуют о восстановлении его пластичности по показателю ψ в сравнении с крупнокристаллическим состоянием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – К. : Вища шк., 1983. – 175 с.
2. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.
3. Хилл Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл; пер. с англ. Э. И. Григолюк. – М. : Госизд-во технико-теоретической лит-ры, 1956. – 407 с.
4. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций / [Бейгельзимер Я. Е., Варюхин В. Н., Орлов Д. В., Сынков С. Г.]. – Донецк : ТЕАН, 2003. – 87 с.
5. Beygelzimer Y. Grain refinement versus voids accumulation during severe plastic deformations of polycrystals : A mathematical simulation / Y. Beygelzimer // *Mechanics of Materials*. – 2005. – V. 37. – №. 7. – P. 753–767.

Бейгельзимер Я. Е. – д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотрудник ДонФТИ НАНУ;
 Прокофьева О. В. – канд. техн. наук, мл. науч. сотрудник ДонФТИ НАНУ;
 Кулагин Р. Ю. – аспирант ДонФТИ НАНУ.

ДонФТИ НАНУ – Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина
 Национальной академии наук Украины, г. Донецк.

E-mail: yanbeygel@gmail.com