

ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛАСТИЧНОСТИ, ОПРЕДЕЛЯЕМАЯ МЕТОДОМ ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова

*Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины,
Киев, Украина*

E-mail: milman@ipms.kiev.ua; тел. +38(044)424-30-61, +38(044)424-31-84

Рассмотрены методы определения характеристики пластичности δ_H при измерении твердости и нанотвердости. Параметр δ_H характеризует пластичность материалов долей пластической деформации в общей упругопластической деформации. Величина δ_H определена для металлов с различным типом кристаллической решетки, ковалентных и частично ковалентных кристаллов, интерметаллидов, аморфных металлических сплавов и квазикристаллов. Обсуждается зависимость характеристики пластичности от структурных факторов и температуры. Параметр δ_H позволяет проанализировать и сравнить пластичность материалов, хрупких при стандартных механических испытаниях. Сочетание твердости H как прочностной характеристики и характеристики пластичности δ_H позволяет более полно характеризовать механическое поведение материала, чем только твердость H . Приведены примеры использования характеристики пластичности δ_H .

1. ВВЕДЕНИЕ

В физике прочности можно выделить два фундаментальных свойства, определяющих механическое поведение материалов: прочность и пластичность. Прочность материала определяется его способностью сопротивляться приложенной силе [1]. Более конкретно прочность твердых тел может быть определена как сопротивление разрыву тела на две или несколько частей [2]. Прочность рассчитывается адекватно этим определениям при испытании на растяжение как разрушающая нагрузка, деленная на площадь поперечного сечения образца.

Слово пластичность происходит от греческого слова *plastikos* – годный для лепки, податливый. Физики определяют пластичность как фундаментальное свойство вне связи с возможностью разрушения материала. Это обусловлено тем, что разрушение – сложный процесс, и простое фундаментальное свойство – пластичность – не может определяться через склонность к разрушению.

В физике и инженерии пластичность определяется склонностью материала подвергаться остаточным (permanent) деформациям под нагрузкой [1]. Российскими классиками физики прочности и пластичности А.Н. Орловым и В.Р. Регелем дано определение пластичности, как «свойства твердых тел необратимо деформироваться под действием внешних сил или внутренних напряжений» [3].

Обычно на практике пластичность характеризуют удлинением до разрушения при испытании на растяжение δ или поперечным сужением до разрушения ψ . Эти параметры материала имеют большое практическое значение, однако они не полностью отражают смысл приведенных выше определений пластичности, так

как определяют условия перехода от пластической деформации к разрушению и не всегда коррелируют с определением пластичности, как склонности материала подвергаться остаточным деформациям под нагрузкой.

Действительно, параметры δ и ψ определяются не только пластичностью, но еще, по крайней мере, двумя условиями: соотношением между напряжением течения σ_s и разрушающим напряжением σ_f , а также деформационным упрочнением. Параметр δ обычно включает равномерную деформацию и деформацию после образования стабильной «шейки» и локализации в ней деформации. Увеличение деформационного упрочнения $\left(\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}\right)_\epsilon$ повышает δ для пластичных

металлов (Al, Cu), но снижает δ в малопластичных материалах, где достигается условие $\sigma_s = \sigma_f$. Пластичность материала в ее приведенном выше физическом определении должна непрерывно повышаться с ростом температуры, поскольку повышение температуры облегчает движение дислокаций в твердых телах (за исключением некоторых интерметаллидов).

Однако для большинства материалов параметр δ немонотонно изменяется с ростом температуры вследствие того, что температура испытания влияет также на условия разрушения (транскристаллитное или интеркристаллитное), на деформационное упрочнение и соотношение σ_s и σ_f .

Механические испытания на растяжение эффективны для сталей и пластичных металлов. Но новые материалы: керамика, квазикристаллы, интерметаллиды, наноматериалы, аморфные металлические сплавы, фуллериты и различные композиты – малопластичны или хрупки при испытании на растяжение при комнатной

температуре, это же относится к ОЦК-металлам (Cr, Mo, W) – ниже температуры хладноломкости T_x . Для всех этих материалов $\delta = 0$, и испытания на растяжение не характеризуют их пластичность. Многофакторная зависимость параметра δ не позволила разработать теорию зависимости пластичности от внутренних (размер зерна, плотность дислокаций) и внешних параметров (температура, скорость деформации).

Поэтому целесообразным оказалось введение новой характеристики пластичности как доли пластической деформации в общей упруго-пластической деформации. Такая характеристика (соответствующая физическому определению пластичности, как способности материала к пластической деформации) была предложена в работе [4] в виде безразмерного параметра

$$\delta^* = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_t} = 1 - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_t}, \quad (1)$$

где ε_p , ε_e и ε_t – соответственно пластическая, упругая и общая деформации, причем $\varepsilon_t = \varepsilon_p + \varepsilon_e$.

Эта характеристика пластичности может быть определена при различных методах механических испытаний (растяжение, сжатие, изгиб), но проще определять ее при индентировании пирамидальными инденторами, как показано в [4-6].

При индентировании малый объем деформируемого материала и особый характер полей напряжения уменьшают склонность к макроскопическому разрушению и резко снижают температуру хладноломкости, что делает возможным определение твердости и характеристики пластичности для большинства материалов даже при криогенных температурах.

Характеристика пластичности, определенная в соответствии с (1) методом индентирования, была обозначена как δ_H .

В работе [4] средняя упругая деформация на контактной площадке индентор–образец в направлении приложенной к индентору нагрузки была получена в виде

$$\varepsilon_e = -\frac{HM}{E}(1 - \nu - 2\nu^2). \quad (2)$$

Здесь HM – твердость по Мейеру, которая рассматривается как среднее контактное давление, E – модуль Юнга и ν – коэффициент Пуассона исследуемого материала.

Общая деформация ε_t определена для пирамидальных инденторов как

$$\varepsilon_t = -\ln \sin \gamma, \quad (3)$$

где γ – угол между гранью и осью пирамиды.

Тогда в соответствии с (1) для пирамидального индентора характеристика пластичности, определенная при индентировании:

$$\delta_H = 1 - \frac{HM}{E \cdot \varepsilon_t}(1 - \nu - 2\nu^2). \quad (4)$$

В частности, для индентора Виккерса, учитывая, что $HV = HM \sin \gamma$, а $\gamma = 68^\circ$, имеем:

$$\delta_H = 1 - 14,3(1 - \nu - 2\nu^2) \frac{HV}{E}. \quad (4a)$$

Для твердости по Берковичу, в которой используется трехгранный индентор с углом $\gamma = 65^\circ$ и твердость определяется, как отношение нагрузки к площади проекции отпечатка на поверхность образца:

$$\delta_H = 1 - 10,2 \cdot (1 - \nu - 2\nu^2) \frac{HM}{E}. \quad (4b)$$

Как видно из (1), должно выполняться соотношение $0 < \delta_H < 1$. При этом показано, что для пластичных при растяжении материалов $\delta_H \geq 0,9$.

Подобная характеристика пластичности δ_H может быть определена и при инструментальном индентировании, когда записываются кривые нагружения и разгрузки в координатах нагрузка на индентор P –перемещение индентора h (рис. 1). В этом случае характеристика пластичности

$$\delta_A = \frac{A_p}{A_t} = 1 - \frac{A_e}{A_t}, \quad (5)$$

где A_p , A_e и A_t – соответственно работа, затрачиваемая на пластическую, упругую и общую деформации при внедрении индентора.

При этом соотношение A_e/A_t может быть определено по соотношению площадей под кривыми разгрузки и нагружения.

Показано, что $\delta_H \approx \delta_A$, если они определяются одинаковыми инденторами и при одинаковой нагрузке на индентор [7].

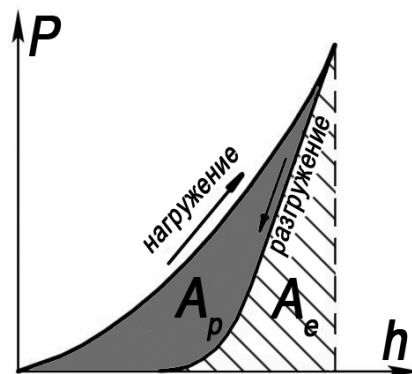


Рис. 1. Диаграмма внедрения пирамидального индентора в координатах нагрузка P –перемещение индентора h

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИЧНОСТИ δ_H

В работе [8] была установлена корреляция между удлинением до разрушения δ и характеристикой пластичности δ_H при микроиндентировании для твердого сплава WC-6 % вес. Со (со средним размером зерна $d = 1,3$ мкм) в интервале температур $20 \dots 1000^\circ\text{C}$. Как видно из рис. 2, при температуре, ниже температуры хладноломкости T_x данного сплава, только δ_H может характеризовать его пластичность.

Типичные значения характеристики пластичности δ_H для различных кристаллических материалов с различным типом межатомной связи и различной кристаллографической структурой, а также для аморфных металлических сплавов и квазикристаллов приведены в таблице.

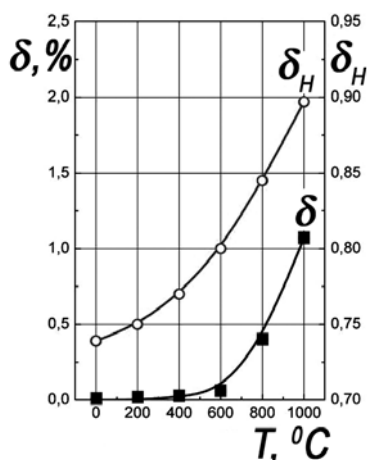


Рис. 2. Температурная зависимость удлинения до разрушения δ и характеристики пластичности δ_H при микроиндентировании для твердого сплава WC-6 вес. %Co

Характеристика пластичности δ_H для различных материалов при комнатной температуре

Материал	δ_H	
ГЦК-металлы (Cu, Al, Au, Ni)	0,97...0,99	
ОЦК-металлы (Fe, Mo, Nb, Cr и др.)	0,92...0,97	
ГПУ-металлы (Co, Re, Ti и др.)	0,95...0,97	
Сталь 0,8% C	Зернистый перлит	0,92
	Сорбит	0,91
	Мартенсит	0,79
Интер-металлиды	Al ₃ Ti	0,76
	Al ₆₁ Cr ₁₂ Ti ₂₇	0,81
	Al ₆₆ Mn ₁₁ Ti ₂₃	0,87
АМС	Ленты на основе Fe и Co	0,60
	Массивные образцы на основе Zr и Ti	0,70...0,75
Квази-кристаллы	Al ₆₃ Cu ₂₅ Fe ₁₂	0,47
	Al ₇₀ Pd ₂₀ Mn ₁₀	0,72
Керамика	α-SiC (0001)	0,29
	Al ₂ O ₃ (0001)	0,40
	TiB ₂	0,44
	TiC (100)	0,46
	ZrC (100)	0,45
	NbC (100)	0,56
	ZrN	0,64
	WC (0001)	0,83
Ковалентные кристаллы	C (алмаз) (001)	0,0012
	Si (111)	0,42*
	Ge (111)	0,49*
Покрытия	На основе TiN	0,55...0,65
	На основе TiC	0,45

*Фазовый переход при индентировании

Для чистых металлов $0,9 < \delta_H < 1,0$. Величина δ_H выше для металлов с ГЦК-решеткой (Ni, Al, Cu, Au), чем для металлов с ОЦК (Mo, Cr, Fe, Nb и др.) и ГПУ-решетками (Co, Re, Ti и др.). Для углеродистой стали характеристика пластичности δ_H хорошо коррелирует со значениями пластичности δ , определенными при растяжении для всех состояний, в которых используется сталь. При этом для углеродистой стали появляется возможность характеризовать ее пластичность в закаленном состоянии со структурой мартенсита, где $\delta = 0$.

Для исследованных интерметаллидов на основе Al₃Ti значение δ_H ниже 0,9. Но при переходе от тетрагональной DO₂₂ структуры с низкой симметрией для Al₃Ti к структуре с кубической симметрией L1₂ (путем легирования интерметаллида Al₃Ti хромом или марганцем) δ_H существенно возрастает. Для аморфных металлов (АМС) на основе железа, которые производятся методом спиннингования в виде лент толщиной 30...50 мкм, $\delta_H \approx 0,60$. Несколько больше характеристика пластичности для массивных АМС на основе Ti и Zr, для которых $\delta_H = 0,7...0,75$. Для новых материалов – квазикристаллов – при комнатной температуре δ_H существенно ниже 0,9.

Как видно из таблицы, минимальное значение δ_H имеет алмаз. Для других ковалентных кристаллов (кремния и германия) δ_H несколько выше в связи с фазовым переходом полупроводник → металл при индентировании [9]. Низкий уровень пластичности имеют также SiC и Al₂O₃, у которых ковалентная составляющая межатомной связи существенна. Среди тугоплавких соединений по степени увеличения значения δ_H располагаются бориды, карбиды и нитриды переходных металлов. Для карбидов IV-A группы (TiC, ZrC), так же как и для карбида NbC и боридов, $\delta_H \approx 0,5$, т.е. пластическая деформация составляет примерно 50 % от общей деформации под индентором. В то же время карбид вольфрама имеет значительно большую величину $\delta_H = 0,82$, что обуславливает его большое преимущество перед другими тугоплавкими соединениями. Нужно отметить, что высокое значение δ_H в карбиде вольфрама объясняется как высоким значением модуля Юнга $E \approx 700$ ГПа, так и низкой твердостью (по сравнению с другими карбидами). Для нитридов $\delta_H \approx 0,6$, что несколько выше, чем для боридов и карбидов (исключая карбид вольфрама).

Значения δ_H , приведенные в таблице, при температуре выше T_x коррелируют с соответствующими значениями пластичности δ ,

определенными при стандартных механических испытаниях. Однако только определение параметра δ_H позволяет сравнить пластичность большого числа материалов, которые обычно принято считать хрупкими и которые могут быть упруго-пластически деформированы при-indentировании без макроскопического разрушения.

3. ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКУ ПЛАСТИЧНОСТИ δ_H

Сложный физический смысл удлинения до разрушения при испытании на растяжение δ не позволил за многие годы использования этой величины разработать теорию зависимости δ от структурных факторов, температуры и скорости деформации. Вместе с тем эти вопросы успешно решены для предела текучести σ_S . Поскольку характеристика пластичности $\delta_H = 1 - \text{const} \frac{HM}{E}$, а $HM \approx C\sigma_S$ (где $C = \text{const}$, σ_S – предел текучести), то оказалось возможным найти эти зависимости и для δ_H .

Так, если зависимость σ_S от размера зерна d описывается хорошо известным уравнением Холла-Петча $\sigma_S = \sigma_0 + K_y d^{-1/2}$, то, используя выражение (4), получаем

$$\delta_H = \delta_{H_0} - K_1 d^{-1/2}, \quad (6)$$

где δ_{H_0} – пластичность монокристалла, а

$$K_1 = \frac{CK_y}{E\varepsilon_t} (1 - \nu_1 - 2\nu_1^2).$$

Для примера на рис. 3 показана зависимость характеристики пластичности от размера зерна для меди и железа.

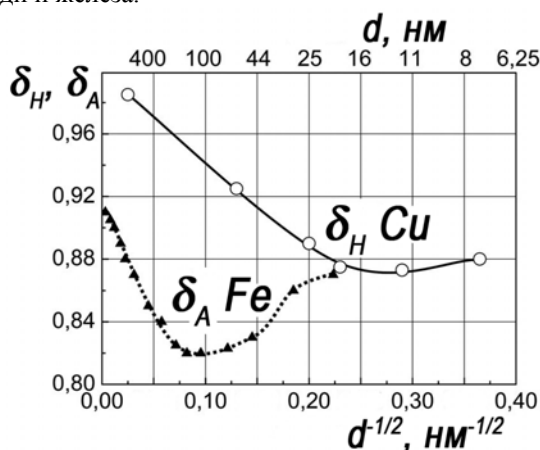


Рис. 3. Зависимость характеристики пластичности от размера зерна для наноструктурных меди и железа [10]

На линейных участках зависимостей выполняются соотношения Холла-Петча и (6) для характеристики пластичности δ_H . Из рисунка видно, что величина δ_H может быть определена и

для металлов в наноструктурном состоянии, где часто (в особенности для ОЦК-металлов) $\delta = 0$.

Если зависимость предела текучести от плотности хаотически распределенных дислокаций ρ описывается надежно установленным соотношением $\sigma_S = \sigma_0 + \alpha Gb\sqrt{\rho}$, где σ_0 – предел текучести бездислокационного кристалла; G – модуль сдвига; b – модуль вектора Бюргерса и α – константа, то

$$\delta_H = \delta_{H1} - K_2 \sqrt{\rho}, \quad (7)$$

где δ_{H1} – пластичность кристалла при $\rho = 0$, а

$$K_2 = \frac{C\alpha Gb}{E\varepsilon_t} (1 - \nu - 2\nu^2).$$

Из соотношений (6) и (7) видно, что характеристика пластичности δ_H снижается при росте плотности дислокаций и с уменьшением размера зерна. Из (4) следует, что δ_H снижается также при любом другом упрочнении, ведущем к росту HM .

4. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКУ ПЛАСТИЧНОСТИ δ_H

Поскольку твердость, измеренная пирамидальными инденторами, соответствует напряжению течения при некоторой фиксированной степени деформации, то для описания температурной зависимости твердости целесообразно использовать теорию, описывающую условный предел текучести, а не критическое напряжение сдвига или нижний предел текучести.

В работах [4, 11] была использована теория условного предела текучести, развитая в [12, 13].

В частности, в интервале холодной деформации при температуре $T < T^*$ (где T^* – характеристическая температура деформации [14]) получено соотношение:

$$\delta_H = \delta_H(0) + \frac{AT}{VE} \ln \frac{M}{\dot{\varepsilon}}, \quad (8)$$

где $\delta_H(0)$ – пластичность при 0 К,

$$\delta_H(0) = 1 - \frac{HM(0)}{E\varepsilon_t} (1 - \nu - 2\nu^2) = 1 - \frac{C\sigma_S(0)}{E\varepsilon_t} \times (1 - \nu - 2\nu^2); \quad (8a)$$

$$A = \frac{Ck}{\varepsilon_t} (1 - \nu - 2\nu^2),$$

V – активационный объем; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации; k – константа Больцмана и M – константа материала.

Из соотношения (8) следует, что при низких температурах δ_H должна линейно увеличиваться с ростом температуры, что подтверждается экспериментальными данными, полученными в [4] (рис. 4).

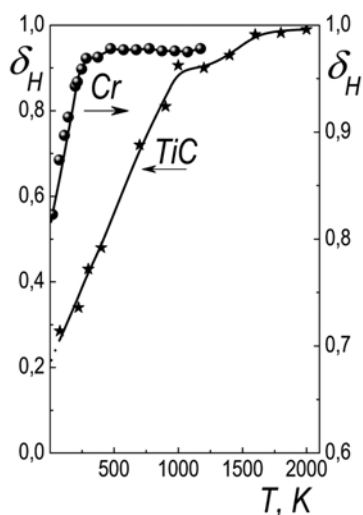


Рис. 4. Температурная зависимость характеристики пластичности δ_H для Cr и TiC

5. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИЧНОСТИ

Представляется целесообразным расчет характеристики δ_H производить при любых исследованиях влияния химического состава, термомеханической обработки и структурного состояния на твердость, микротвердость и нанотвердость материалов. Сочетание прочностной характеристики H и характеристики пластичности δ_H позволяет более полно характеризовать механическое поведение материала, чем только твердость H .

Исследование характеристики δ_H позволяет объяснить феноменальные свойства твердых сплавов WC-Co, поскольку, как уже отмечалось, WC характеризуется достаточно высокой для инструментального материала твердостью в сочетании с очень высокой для тугоплавких соединений пластичностью δ_H . Неоднократные попытки заменить WC на более твердые соединения ZrC и TiC не увенчались успехом, поскольку эти соединения обладают существенно более низкой пластичностью.

Анализ значений δ_H (см. таблицу) позволяет классифицировать группы материалов (включая новые малопластичные или хрупкие) по пластичности. Значение δ_H снижается в ряду: металлы – интерметаллиды – АМС – керамика – квазикристаллы.

Как показано в [15], для сверхпластичных материалов определение температурной зависимости δ_H позволяет определить оптимальную температуру сверхпластической деформации. Хорошо известно, что деформированные (наклепанные) металлы обычно имеют меньшую пластичность, чем отожженные (исключая случай, когда деформация снижает температуру хладноломкости T_X).

Однако использование характеристики пластичности δ_H показало, что для квазикристаллов ситуация противоположная: пластическая деформация снижает твердость H и повышает

характеристику пластичности δ_H , тогда как отжиг повышает H и снижает δ_H .

Применение параметра δ_H оказалось очень эффективным для определения работоспособности керамических покрытий [16]. Было показано, что эти покрытия могут работать при сравнительно низких значениях δ_H . Необходимое условие работоспособности таких покрытий $\delta_H > 0,45 \dots 0,55$.

Отметим еще, что управление приборами инструментального индентирования может быть сделано дистанционным, что позволяет определять характеристику пластичности (и твердость) для целей атомной энергетики, используя простые образцы в виде шлифов и практически не повреждая их в процессе измерения.

ВЫВОДЫ

Современные методы индентирования позволяют определять не только прочностную характеристику (твердость, микротвердость, нанотвердость), но и характеристику пластичности δ_H , которая изменяется от 0 при чисто упругом внедрении индентора до 1 для полностью пластической деформации.

Температура вязкохрупкого перехода большинства материалов может быть определена как температура, при которой $\delta_H \approx 0,9$.

Любое упрочнение, обусловленное уменьшением размера зерна, ростом плотности дислокаций, повышением высоты потенциальных барьеров Пайерлса и уменьшением их ширины, снижением температуры и др. факторами, приводит к снижению δ_H .

В то же время рост модуля Юнга E , который определяет и прочностные характеристики, приводит к увеличению δ_H .

Характеристика пластичности δ_H , определяемая из измерений твердости, является эффективным методом оценки пластичности различных кристаллических и некристаллических материалов в широком температурном интервале.

При разработке новых высокопрочных материалов необходимо стремиться к оптимальному сочетанию твердости и пластичности δ_H .

Развитые представления и методики определения характеристики пластичности δ_H при измерении микротвердости и нанотвердости позволяют сопоставлять и анализировать пластичность различных материалов вне зависимости от того, являются ли они пластичными, малопластичными или хрупкими при испытании на растяжение.

Представляется целесообразным рассчитывать характеристику пластичности δ_H при стандартных измерениях твердости, микротвердости и нанотвердости, так как сочетание твердости H и пластичности δ_H более полно характеризует механическое поведение материала, чем только H .

Инструментальная твердость с дистанционным управлением открывает широкие возможности определения δ_H и H для задач атомной энергетики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wikipedia. The free encyclopedia.
2. С.Н. Журков, А.Н. Орлов, В.Р. Регель. Прочность // *Физический энциклопедический словарь*. М.: «Советская энциклопедия», 1965, т. 4, с. 235-238.
3. А.Н. Орлов, В.Р. Регель. Пластичность // *Там же*, с. 39.
4. Yu.V. Milman, B.A. Galanov, S.I. Chugunova. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement (overview N 107) // *Acta Met. and Mater.* 1993, v. 41, N 9, p. 2523-2532.
5. Б.А. Галанов, Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова. Исследование механических свойств высокотвердых материалов методом индентирования // *Сверхтвердые материалы*. 1999, №3, с. 25-38.
6. Yu.V. Milman. Plasticity characteristic obtained by indentation // *J. of Physics D: Applied Physics*. 2008, v. 41, p. 074013 (9 p.).
7. Ю.В. Мильман, С.Н. Дуб, А.А. Голубенко. Масштабная зависимость твердости и характеристики пластичности, определяемой при индентировании // *Деформация и разрушение материалов*. 2008, №8, с. 3-10.
8. Yu.V. Milman, S. Luyckx, A.V. Goncharuck, J.T. Northrop. Results from bending tests on submicron and micron WC-Co grades at elevated temperatures // *Inter. J. of Refractory Metals & Hard Materials*. 2002, v. 20, p. 71-79.
9. I.V. Gridneva, Yu.V. Milman, V.I. Trefilov. Phase transition in diamond structure crystals at hardness measurement // *Phys. Status solidi (a)*. 1972, v. 14, p. 177-182.
10. А.И. Юркова, Ю.В. Мильман, А.В. Бякова. Структура и механические свойства железа после поверхностной интенсивной пластической деформации трением: II. Механические свойства нано- и субмикрористаллического железа // *Деформация и разрушение материалов*. 2009, №2, с. 2-8.
11. Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова. Исследование механического поведения малопластичных материалов методом индентирования // *Особенности структуры и свойств перспективных материалов* / Под общ. ред. А.И. Потеева. Томск: Изд-во НТЛ, 2006, с. 301-322.
12. Ю.В. Мильман, В.И. Трефилов. О физической природе температурной зависимости предела текучести // *Порошковая металлургия*. 2010, №7/8(474), с. 3-18.
13. В.И. Трефилов, Ю.В. Мильман, С.А. Фирстов. *Физические основы прочности тугоплавких металлов*. Киев: «Наукова думка», 1975, 315 с.
14. V.I. Trefilov, Yu.V. Milman, I.V. Gridneva. Characteristic temperature of deformation of crystalline materials // *Crys. Res. and Technol.* 1984, v. 19, N 3, p. 413-421.
15. Yu.V. Milman, W. Lojkowski, S.I. Chugunova, D.V. Lotsko, I.V. Gridneva, A.A. Golubenko. Indentation technique for determination of mechanical behaviour of nanomaterials (bulk and coatings) // *Solid State Phenomena*. 2003, v. 94, p. 55-58.
16. А.В. Бякова. Структурные аспекты прочности и пути повышения работоспособности карбидных покрытий // *Порошковая металлургия*. 2000, №1-2, с. 97-106.

Статья поступила в редакцию 09.06.2011 г.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛАСТИЧНОСТІ, ЩО ВИЗНАЧАЄТЬСЯ МЕТОДОМ ІНДЕНТУВАННЯ Ю.В. Мільман, С.І. Чугунова, І.В. Гончарова

Розглянуто методи визначення характеристики пластичності δ_H при вимірі твердості й нанотвердості. Параметр δ_H характеризує пластичність матеріалів часткою пластичної деформації в загальній пружно-пластичній деформації. Величина δ_H визначена для металів з різним типом кристалічних ґрат, ковалентних і частково ковалентних кристалів, інтерметалідів, аморфних металевих сплавів і квазікристалів. Обговорюється залежність характеристики пластичності від структурних факторів і температури. Параметр δ_H дозволяє проаналізувати і порівняти пластичність матеріалів, крихких при стандартних механічних випробуваннях. Поєднання твердості H як міцносної характеристики і характеристики пластичності δ_H дозволяє більш повно характеризувати механічну поведінку матеріалу, ніж тільки твердість H . Наведені приклади використання характеристики пластичності δ_H .

PLASTICITY CHARACTERISTIC OBTAINED BY INDENTATION Yu.V. Milman, S.I. Chugunova, I.V. Goncharova

Methods for determination plasticity characteristic δ_H in the measurement of hardness and nanohardness are considered. Parameter δ_H characterizes the plasticity of a material by the part of plastic deformation in the total elastic-plastic deformation. The value of δ_H is defined for metals with different types of crystal lattice, covalent and partially covalent crystals, intermetallics, metallic glasses and quasicrystals. It is discussed the dependence of the plasticity characteristic δ_H on structural factors and temperature. Parameter δ_H allows to analyze and compare the plasticity of materials which are brittle at standard mechanical tests. The combination of hardness H , as the strength characteristic, and the plasticity characteristic δ_H makes possible the better characterization of mechanical behavior of materials than only the hardness H . The examples of plasticity characteristic δ_H application are represented.