

## К вопросу определения пластичности материалов методом индентирования

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

*Представлены результаты по определению пластичности методом индентирования ряда материалов, включая хрупкие и малопластичные при испытании на растяжение. Показано, что с достаточной для практики точностью для всех материалов можно рассчитывать пластичность по формуле*

$$\delta_H^* = 1 - 14,3(1 - \nu - 2\nu^2) \frac{HV}{E} \quad (HV — \text{твердость; } E — \text{модуль Юнга и } \nu —$$

*коэффициент Пуассона материала). Эту формулу можно также использовать в аналитических расчетах зависимости пластичности от структурных параметров и внешних факторов (температура, скорость деформации и др.).*

### Введение

В физике прочности имеется существенное противоречие между теоретическим определением пластичности, как фундаментального свойства материалов, и практически используемой характеристикой пластичности.

Физические подходы определяют пластичность как свойство материалов необратимо изменять свою форму и размеры под действием приложенных нагрузок [1—4]. Иными словами, пластичность твердых тел характеризуется способностью материала к необратимой пластической деформации под действием нагрузок.

Поскольку пластичность рассматривается как фундаментальное свойство материала, в ее определение не входит склонность к разрушению, которое само по себе является сложным процессом и не может входить в определение такого свойства, как пластичность. Однако известно, что на практике пластичность обычно характеризуют удлинением образца до разрушения при испытании на растяжение  $\delta$ . Это приводит к ряду противоречивых выводов. Так, пластичность, которая определяется подвижностью дислокаций в кристалле, должна непрерывно увеличиваться с ростом температуры  $T$  (исключение составляют некоторые интерметаллиды). Однако зависимость  $\delta(T)$  обычно имеет немонотонный характер с минимумами и максимумами даже при испытании монокристаллов. Это обусловлено тем, что образование стабильной “шейки” при растяжении образцов (которое приводит к переходу от равномерной деформации к деформации, локализованной в “шейке”) зависит не только от сопротивления материала пластической деформации, но и от деформационного упрочнения.

Деформационное упрочнение повышает твердость материала и обычно снижает возможность его обработки давлением, то есть с физической точки зрения — уменьшает пластичность, однако величина  $\delta$  обычно растет с увеличением деформационного упрочнения. В поликристаллах зависимость  $\delta(T)$  имеет еще более сложный характер, чем в монокристал-

лах в связи с изменением характера разрушения (транс- или интеркристаллитное разрушение). Отметим, что подавляющее большинство новых материалов (керамика, квазикристаллы, аморфные металлические сплавы, интерметаллиды и др.) являются малопластичными или хрупкими при испытании на растяжение. Поэтому их сравнительную пластичность вообще невозможно охарактеризовать величиной  $\delta$ . Сложившаяся ситуация сделала целесообразным введение новой характеристики пластичности, как доли пластической деформации в общей упругопластической деформации. Такая характеристика, соответствующая физическому определению этого свойства, была предложена в работе [5] в виде безразмерного параметра

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

где  $\varepsilon_p$ ,  $\varepsilon_e$  и  $\varepsilon_t$  — соответственно пластическая, упругая и общая деформация, причем  $\varepsilon_t = \varepsilon_p + \varepsilon_e$ .

Эта характеристика пластичности может быть определена при различных методах механических испытаний (растяжение, сжатие, изгиб), но наиболее целесообразно, как показано в работах [5—8], определять ее при индентировании пирамидальными инденторами. 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  $\delta_H^*$  для большинства материалов даже при криогенных температурах. Вследствие приблизительного подобия отпечатков при изменении нагрузки на пирамидальный индентор определение  $\delta_H^*$  автоматически выполняется при постоянной степени деформации  $\varepsilon_t$ , что важно для этой характеристики.

В работе [5] для определения характеристики пластичности при использовании индентора Виккерса получено выражение

$$\delta_H^* = 1 - 14,3(1 - \nu_1 - 2\nu_1^2) \frac{HV}{E_1}, \quad (2)$$

где  $HV$  — твердость по Виккерсу;  $\nu_1$  — коэффициент Пуассона;  $E_1$  — модуль Юнга.

Дальнейшее развитие теория определения характеристики пластичности  $\delta_H^*$  получила в работе [6], где условие несжимаемости материала под индентором использовано только для расчета пластической части деформации  $\varepsilon_p$ , а не общей, как это было сделано в работе [5]. Поэтому результаты, полученные в [6], могут быть использованы для расчета деформаций и характеристики пластичности  $\delta_H^*$  для твердых и сверхтвердых материалов с большой долей упругой деформации при индентировании.

Для пластической деформации в работе [6] получено соотношение

$$\varepsilon_p = -\ln \sqrt{1 + \left( \operatorname{ctg} \gamma - \frac{HM}{kE^*} \right)^2}, \quad (3)$$

здесь  $k = 0,565$  для трех- и четырехгранной пирамид и  $k = 0,5$  для конического индентора с углом при вершине  $2\gamma$ ;  $E^*$  — эффективный модуль Юнга контактной пары индентор—образец.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}. \quad (4)$$

Индексы 1 и 2 соответственно относятся к образцу и индентору.

Упругую деформацию рассчитывают по соотношению

$$\varepsilon_e = -\frac{HM}{E}(1 - \nu_1 - 2\nu_1^2). \quad (5)$$

Используя соотношения (1), (3) и (5), определяют характеристику пластичности  $\delta_H^*$ , однако уравнение (2) оказывается более удобным при аналитических расчетах. Так, если зависимость твердости  $HV$  от размера зерна  $d$  описывается соотношением Холла—Петча, то для  $\delta_H^*$  с использованием (1) получают также соотношение типа Холла—Петча [5]

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

а для упрочнения вследствие повышения плотности дислокаций  $\rho$  —

$$\delta_H^* = \delta_{H_0} - K_2 \sqrt{\rho}, \quad (7)$$

где  $\delta_{H_0}$  — пластичность монокристалла в (6) и пластичность бездислокационного кристалла в (7);  $K_1$  и  $K_2$  — легко рассчитываемые константы. Если известна аналитическая зависимость  $HV$  от температуры  $T$  и скорости деформации  $\dot{\varepsilon}$ , то с помощью (2) получают зависимость  $\delta_H^*(T)$  и  $\delta_H^*(\dot{\varepsilon})$ .

В связи с изложенным цель настоящей работы — сопоставление характеристики пластичности  $\delta_H^*$ , полученной двумя методами, и выяснение возможности использования соотношения (2) с достаточной для практики точностью.

### Материалы и методика исследования

С целью выяснения возможности применения характеристики пластичности, определяемой методом индентирования, для широкого класса материалов с различным характером межатомной связи были выбраны следующие материалы: ковалентные монокристаллы (Si, Ge); широкий класс частично ковалентных тугоплавких соединений в виде монокристаллов ( $Al_2O_3$ , SiC, TiC, ZrC, NbC, WC); металлы с ОЦК решеткой в виде монокристаллов или отожженных поликристаллов (Cr, Mo, W, Nb, Fe), с ГПУ решеткой (Zr, Ti) и ГЦК решеткой (Al, Cu); интерметаллиды на основе алюминия; аморфные материалы на основе Fe, Co в виде лент, полученных спиннингованием; квазикристаллы на основе Al. Такой выбор материалов для исследования обусловлен широкими интервалами значений твердости (0,16—34 ГПа), отношения  $HV/E_1$  (0,002—0,074) и характеристики пластичности  $\delta_H^*$  (0,28—0,99).

Использованы современные методы резки, шлифовки, полировки материалов, что обеспечило высокое качество и совершенство поверхности

Твердость  $HV$  (при нагрузке  $P$ ), модуль Юнга  $E_1$ , коэффициент Пуассона  $\nu_1$ , отношения  $HV/E_1$ ,  $E_1/E^*$  и характеристики пластичности  $\delta_{Н1}^*$  и  $\delta_{Н2}^*$ , рассчитанные соответственно по (2) по усовершенствованной теории

Материал			$HV$ , ГПа	$P$ , Н	$E$ , ГПа	$\nu_1$	$HV/E_1$	$E_1/E^*$	$\delta_{Н1}^*$	$\delta_{Н2}^*$
ГЦК металлы	1	Al	0,16	0,5	71	0,35	0,002	0,936	0,99	0,99
	2	Cu	0,45	0,5	130	0,343	0,003	0,990	0,98	0,98
ОЦК металлы	3	Cr	1,30	2	298	0,31	0,004	1,150	0,97	0,97
	4	Mo (111)	1,85	1	324	0,293	0,006	1,181	0,96	0,96
	5	W (001)	4	2	420	0,28	0,010	1,268	0,92	0,92
	6	Nb	1,13	2	104	0,397	0,011	0,928	0,96	0,95
	7	Fe	1,40	2	211	0,28	0,007	1,096	0,95	0,94
ГПУ металлы	8	Ti иодидный	1,03	2	120	0,36	0,008	0,969	0,95	0,95
	9	Zr иодидный	1,07	2	98	0,38	0,011	0,936	0,95	0,95
Ковалентные кристаллы	10	Si (111)	10,5	2	160	0,22	0,065	1,08	0,36	0,42
	11	Ge (111)	7,2	2	130	0,21	0,055	1,063	0,44	0,49
Тугоплавкие соединения	12	WC (0001)	16,7	2	700	0,31	0,024	1,481	0,83	0,81
	13	$\alpha$ -SiC (0001)	34	2	457	0,22	0,074	1,328	0,28	0,29
	14	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (0001)	20,4	2	323	0,23	0,063	1,213	0,40	0,41
	15	TiC (100)	24	1	465	0,191	0,052	1,347	0,46	0,46
	16	ZrC (100)	22	1	410	0,196	0,054	1,300	0,44	0,46
	17	NbC (100)	24	1	550	0,21	0,044	1,410	0,56	0,54
Интерметаллиды (ИМ)	18	Al <sub>3</sub> Ti	4,94	2	156	0,3	0,032	1,037	0,76	0,76
	19	Al <sub>6</sub> Cr <sub>12</sub> Ti <sub>27</sub>	3,20	2	178	0,19	0,018	1,111	0,81	0,81
	20	Al <sub>66</sub> Mn <sub>11</sub> Ti <sub>23</sub>	2,04	2	168	0,19	0,012	1,102	0,87	0,87
Аморфные металлические сплавы (АМС)	21	Fe <sub>83</sub> B <sub>17</sub>	9,3	1	171	0,3	0,054	1,051	0,60	0,58
	22	Fe <sub>40</sub> Ni <sub>38</sub> Mo <sub>4</sub> B <sub>18</sub>	7,4	1	152	0,3	0,049	1,035	0,64	0,62
	23	Co <sub>50</sub> Ni <sub>10</sub> Fe <sub>5</sub> Si <sub>18</sub> B <sub>17</sub>	8,6	1	167	0,3	0,051	1,048	0,62	0,60
Квазикристаллы (КК)	24	Al <sub>63</sub> Cu <sub>23</sub> Fe <sub>12</sub>	7,43	2	113	0,28	0,066	1,015	0,47	0,48
	25	Al <sub>70</sub> Pd <sub>20</sub> Mn <sub>10</sub>	7,0	2	200	0,28	0,035	1,087	0,72	0,71

металлографических шлифов для измерения твердости. Локальное нагружение материалов проводили пирамидальным индентором Виккерса на микротвердомере ПМТ-3 при различных нагрузках  $P$  на индентор в зависимости от твердости материала.

Характеристики пластичности  $\delta_{Н}^*$  для исследованных материалов определяли из измерений твердости по описанным методикам. Значение  $\delta_{Н}^*$ , рассчитанное по уравнению (2), будем обозначать  $\delta_{Н1}^*$ , тогда как значение этой же величины, определенное по усовершенствованной теории и уравнениям (1), (3) и (5), —  $\delta_{Н2}^*$ .

Характеристики материалов и результаты исследований представлены в таблице.

### Обсуждение результатов

Данные таблицы позволяют сопоставить пластичность различных материалов вне зависимости от того, являются ли они пластичными,

малопластичными или хрупкими при испытании на растяжение. Как следует из (1), для безразмерного параметра  $\delta_H^*$  должно выполняться соотношение  $0 < \delta_H^* < 1$ . При этом для большинства материалов удлинение до разрушения  $\delta > 0$ , если  $\delta_H^* \geq 0,9$  [5]. Из таблицы следует, что наибольшую пластичность  $\delta_H^*$  имеют ГЦК металлы, далее следуют ОЦК и ГПУ металлы. В интерметаллидах  $\delta_H^*$  несколько ниже 0,9, однако существенно выше, чем в аморфных металлических сплавах, квазикристаллах и тем более в тугоплавких соединениях и ковалентных кристаллах. Только для металлов  $\delta_H^* > 0,9$ , то есть наблюдается существенная пластичность при испытании на растяжение.

Из таблицы следует также, что отличие  $\delta_{H1}^*$  от  $\delta_{H2}^*$  для большинства материалов невелико или они даже совпадают при определении  $\delta_H^*$  с практически достижимой точностью  $\pm 0,01$ . Существенное отличие  $\delta_{H1}^*$  от  $\delta_{H2}^*$  наблюдается для Si и Ge.

Для теоретического сопоставления результатов расчета  $\delta_H^*$  по двум методикам целесообразно проанализировать зависимость  $\delta_H^*$  от  $HV/E_1$  при различных значениях  $\nu_1$  и соотношения  $E_1/E^*$ . При  $\nu_1 = \text{const}$  уравнение (2) приводит к линейной зависимости  $\delta_H^*$  от  $HV/E_1$ . На рис. 1 представлены такие линейные зависимости при  $\nu_1 = 0,2$  и  $0,3$ . Тугоплавкие соединения и ковалентные кристаллы имеют значение  $\nu_1$ , близкое к 0,2, тогда как для большинства металлов, карбида вольфрама WC, интерметаллидов, аморфных металлических сплавов и квазикристаллов  $\nu_1 \approx 0,3$ .

При использовании усовершенствованной методики расчета величина  $\delta_H^*$  ( $HV/E_1$ ) зависит также и от отношения  $E_1/E^*$  (рис. 2). Из рис. 2 видно, что при  $HV/E_1 < 0,02$  результаты расчетов  $\delta_H^*$  по обеим теориям должны практически совпадать вне зависимости от отношения  $E_1/E^*$ . Условие  $HV/E_1 < 0,02$  выполняется для всех металлов, поэтому для них можно всегда применить уравнение (2).

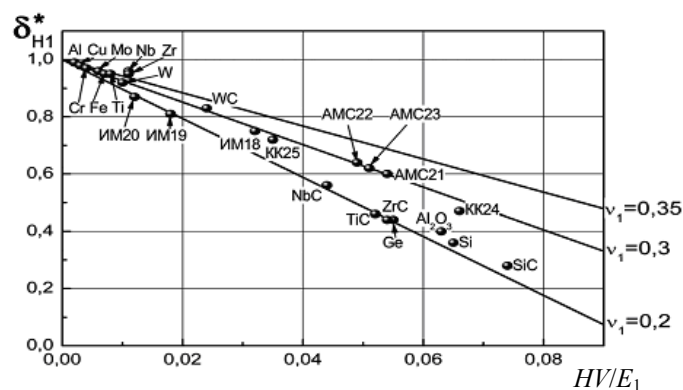


Рис. 1. Зависимость характеристики пластичности  $\delta_{H1}^*$  (рассчитанной по (2)) от соотношения  $HV/E_1$ . Обозначение ряда материалов дано в соответствии с таблицей.

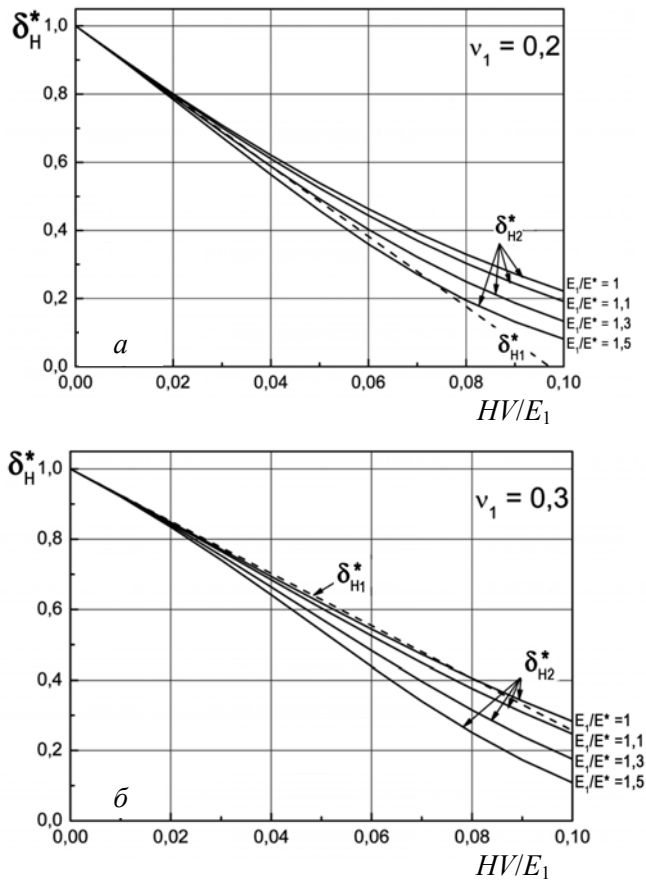


Рис. 2. Зависимость характеристики пластичности  $\delta_{H1}^*$  (рассчитанной по (2)) и  $\delta_{H2}^*$  (рассчитанной по (1), (3) и (5)) от  $HV/E_1$ .  $\delta_{H2}^*$  рассчитана для различных значений  $E_1/E^*$  и  $\nu_1 = 0,2$  (а) и  $0,3$  (б).

При большем отношении  $HV/E_1$  значения  $\delta_{H1}^*$  и  $\delta_{H2}^*$  совпадают только при определенном соотношении  $\nu_1$  и  $E_1/E^*$ . Так, при  $\nu_1 = 0,2$  удовлетворительное совпадение  $\delta_{H1}^*$  и  $\delta_{H2}^*$  наблюдается при  $E_1/E^* \approx 1,3$  (рис. 2, а). Такие значения  $\nu_1$  и отношения  $E_1/E^*$  типичны для большинства тугоплавких соединений (см. таблицу). При  $\nu_1 = 0,3$  наилучшее совпадение  $\delta_{H1}^*$  и  $\delta_{H2}^*$  отмечается для  $E_1/E^* \approx 1$  (рис. 2, б).

На рис. 3 в координатах  $\nu_1 - E_1/E^*$  заштрихованы области, в которых, по расчетам, при  $HV/E_1 \leq 0,06$  (область I) и  $HV/E_1 \leq 0,03$  (область II) выполняется соотношение  $\delta_{H1}^* \approx \delta_{H2}^*$ . Видно, что все исследованные материалы, за исключением WC, попадают в область II. Область I довольно узкая, но интересно, что практически все тугоплавкие соединения с высоким значением  $HV/E_1$  (за исключением WC) попадают в эту область. Поэтому в этих соединениях  $\delta_{H1}^* \approx \delta_{H2}^*$ . Кремний и германий имеют специфику при определении микротвердости, обусловленную фазовым переходом при

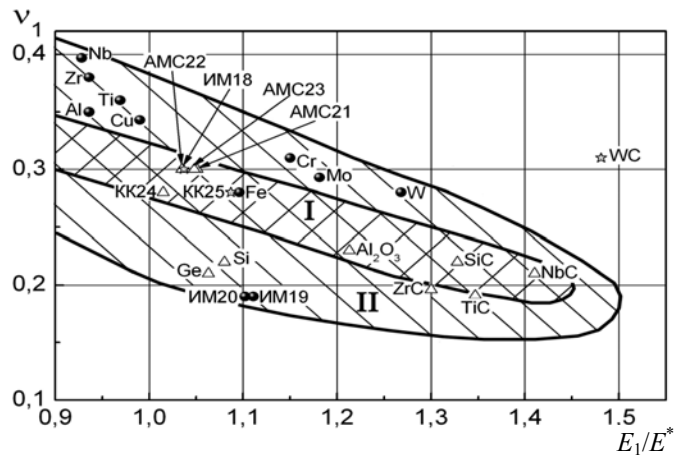


Рис. 3. Расположение исследованных материалов в координатах  $v_1$ — $E_1/E^*$ . Заштрихованы области I и II, в которых может быть использовано соотношение (2) при  $HV/E_1 \leq 0,06$  и  $\leq 0,03$  соответственно: ● —  $HV/E_1 < 0,02$ ; \* —  $0,02 < HV/E_1 < 0,04$ ; Δ —  $HV/E_1 > 0,04$ . Обозначение ряда материалов дано в соответствии с таблицей.

индентировании [9]. Твердость при комнатной температуре в этих материалах определяется давлением фазового перехода, а не пределом текучести. Поэтому и характеристика пластичности  $\delta_H^*$  может рассматриваться для этих кристаллов как пластичность, обусловленная фазовым переходом. Для Si и Ge необходимо определять  $\delta_{H2}^*$ , а не  $\delta_{H1}^*$ , поскольку в этих материалах, в особенности в Si, низкое по сравнению с тугоплавкими соединениями значение  $E_1$ , очень высокое отношение  $HV/E_1$  и при низком значении  $v_1$  низкое отношение  $E_1/E^*$ . У WC при  $v_1 = 0,3$  очень высокое отношение  $E_1/E^* = 1,48$ , что является следствием чрезвычайно высокого модуля Юнга. Однако благодаря низкому значению  $HV/E_1 = 0,024$  различие между  $\delta_{H1}^*$  и  $\delta_{H2}^*$  невелико, что соответствует также данным рис. 2, б.

Из рис. 2 видно, что наилучшее совпадение  $\delta_{H1}^*$  и  $\delta_{H2}^*$  наблюдается при  $v_1 = 0,2$  и  $E_1/E^* \approx 1$ , а также при  $v_1 = 0,3$  и  $E_1/E^* = 1,3$ . Из рис. 3 следует, что именно такие значения  $v_1$  и  $E_1/E^*$  характерны для большинства исследованных материалов. Интерметаллиды ИМ19 и ИМ20 попадают только в область II, но для них  $\delta_{H1}^* = \delta_{H2}^*$  в связи с низким значением  $HV/E_1$ .

Проведенное сопоставление теории [5] ( $\delta_{H1}^*$ ) и усовершенствованной теории [6] ( $\delta_{H2}^*$ ) показывает, что с достаточной для практики точностью для большинства материалов можно использовать более простую теорию [5], то есть рассчитывать пластичность по формуле (2), а также применять эту формулу в аналитических расчетах. Материалы, для которых целесообразно проводить расчеты для определения  $\delta_H^*$  по усовершенствованной теории [6], могут быть определены по графикам рис. 2. Как видно, таких материалов очень немного. При значении  $HV/E_1 \leq 0,02$  для всех материалов  $\delta_H^*$  может быть рассчитана по (2).

## Выводы

Вычисление пластичности методом индентирования в соответствии с физическим определением этого свойства позволяет характеризовать пластичность всех материалов, включая хрупкие и малопластичные при испытании на растяжение. Таким образом, представляется возможность характеризовать пластичность не только металлов, но и керамики, квазикристаллов, интерметаллидов и других новых материалов.

Проведенное сопоставление определения характеристики пластичности по формуле  $\delta_H^* = 1 - 14,3(1 - \nu_1 - 2\nu_1^2) \frac{HV}{E_1}$  в соответствии с теорией, развитой в работе [5], и с усовершенствованной теорией [6] показало, что с достаточной для практики точностью можно использовать более простую теорию [5] и рассчитывать пластичность по приведенной формуле, а также применять эту формулу в аналитических расчетах зависимости пластичности от структурных параметров и внешних факторов (температура, скорость деформации и др.).

Показано, что использование упрощенной теории [5] возможно при определенном соотношении коэффициента Пуассона  $\nu_1$  и отношения  $E_1/E^*$ . При условии  $HV/E_1 \leq 0,02$   $\delta_H^*$  может быть рассчитана для всех материалов по формуле, приведенной в работе [5].

1. Журков С. Н., Орлов А. Н., Регель В. Р. Прочность — сопротивление разрыву тела на два или несколько частей // Физ. энциклопедический словарь. — М.: Сов. энциклопедия, 1965. — 4. — 235 с.
2. Орлов А. Н., Регель В. Р. Физический энциклопедический словарь. — М.: Сов. энциклопедия, 1965. — 4. — С. 39.
3. Ленский В. С. Физический энциклопедический словарь. — М.: Сов. энциклопедия, 1983. — 547 с.
4. Ройтбурд А. Л. Физический энциклопедический словарь. — М.: Сов. энциклопедия, 1965. — 548 с.
5. Milman Yu. V., Galanov B. A., Chugunova S. I. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement (overview 107) // Acta Met. Mater. — 1993. — 41, No. 9. — P. 2523—2531.
6. Galanov B. A., Milman Yu. V., Chugunova S. I., Goncharova I. V. Investigation of mechanical properties of high-hardness materials by indentation // Superhard materials. — 1999. — No. 3. — P. 23—25.
7. Milman Yu. V. Plasticity characteristic obtained by indentation // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2008. — 41. — 074013 (9 p.).
8. Milman Yu. V., Dub S., Golubenko A. Plasticity characteristics obtained through instrumental indentation // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. — 2008. — 1049. — P. 123—128.
9. Gridneva I. V., Milman Yu. V., Trefilov V. I. Phase transition in diamond-structure crystals during hardness measurements // Phys. Stat. Solid. (a). — 1972. — No. 14. — P. 177—182.