



УДК 620.178

Поступила 04.05.2017

## ОЦЕНКА ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

## EVALUATION OF METALLIC MATERIALS PLASTICITY BY DYNAMIC INDENTATION METHOD

*В. А. РУДНИЦКИЙ, А. П. КРЕНЬ, Г. А. ЛАНЦМАН, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Беларусь, Академическая, 16. E-mail: rudnitsky@iaph.bas-net.by*

*V. A. RUDNITSKY, A. P. KREN, G. A. LANTSMAN, Institute of applied physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 16, Akademicheskaya str. E-mail: rudnitsky@iaph.bas-net.by*

*Предложен метод определения пластичности металлических материалов, реализуемый с помощью динамического индентирования материала сферическим наконечником. Измеряемая величина пластичности определяется соотношением пластической и полной деформаций в образующейся при вдавливании лунке и учитывает влияние модуля упругости материала. Получена зависимость, связывающая пластичность и динамическую твердость материалов. Проведены эксперименты на металлах, имеющих модуль упругости от 70 до 380 ГПа и твердость до 62 HRC.*

*The method of plasticity test of metallic materials realized by means of a dynamic dimpling of material by a spherical tip is offered. The measured value of plasticity is defined by a ratio of plastic and complete deformations in the formed indentation which considers influence of an elastic modulus of material. The dependence connecting plasticity and dynamic hardness of materials is received. Experiments on metals from 70 to 380 GPa having an elastic modulus and hardness up to 62 HRC are made.*

**Ключевые слова.** Пластичность, металл, индентирование, удар.

**Keywords.** Plasticity, metal, indentation, impact.

Пластичность наряду с пределом текучести и временным сопротивлением является важнейшей характеристикой металлов, по которой оценивается их способность претерпевать значительную пластическую деформацию перед разрушением. Пластичность металлов имеет очень большое практическое значение: благодаря этому свойству металлы поддаются ковке, прокатке, вытягиванию. Благодаря пластичности в металле происходит перераспределение локальных напряжений по всему объему материала, что уменьшает опасность разрушения. На пластичность металлов, как и на величину твердости, большое влияние оказывают скорость деформации, вид кристаллической решетки и компоненты примесей, что подтверждается значительным отличием пластичности металлов с примесями от чистых металлов.

Как известно, стандартизированной мерой пластичности принято считать относительное удлинение  $\delta$  и относительное сужение  $\psi$ , определяемые при разрушении во время испытаний на растяжение на разрывных машинах [1]. Относительное удлинение  $\delta$  представляет собой отношение приращения длины образца после его разрыва к первоначальной расчетной длине  $l_0$ :

$$d = \frac{l_k - l_0}{l_0}, \quad (1)$$

где  $l_k$  – длина образца после разрыва.

Величину  $\psi$  рассчитывают как отношение уменьшения поперечного сечения разорванного образца к первоначальной площади поперечного сечения  $F_0$ :

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0}, \quad (2)$$

где  $F_k$  – площадь поперечного сечения в месте разрыва.

Часто пластичность характеризуют с помощью энергетического потенциала [2], фактически представляющего собой энергию пластического деформирования при растяжении образца.

В соответствии со значениями  $\delta$ , получаемыми по формуле (1), металлы можно разделить на пластичные, имеющие относительное удлинение в диапазоне 3–60%, и хрупкие с пластичностью менее 3%. К пластичным относятся большинство металлов: сталь, медь, магний, цинк, молибден, вольфрам, висмут и др. Примерами хрупких материалов могут служить хром, марганец, кобальт и различные неметаллические соединения, например, керамика.

К недостаткам описанных методов расчета пластичности можно отнести то, что все они связаны с необходимостью проведения разрушающих испытаний и изготовлением специальных образцов-свидетелей из контролируемого материала. В [3] отмечается, что этот вид испытаний не пригоден для малопластичных или хрупких материалов, например, таких, как керамика, квазикристаллы, интерметаллиды, аморфные металлические сплавы и различные композиты. Кроме того, такое определение пластичности является довольно трудоемким, поэтому вопросы разработки методов оценки пластичности без повреждения в настоящее время актуальны.

Упрощение методов определения пластичности прежде всего связывается с методами индентирования, поскольку твердость, по своей сути, представляет собой комплексную механическую характеристику, являющуюся функцией как прочностных, так и пластических свойств материала. В работе [4] для контроля пластичности низколегированной стали предложена эмпирическая формула:

$$\delta = 1725H^{-0,79}, \quad \%, \quad (3)$$

где  $H$  – твердость, кг/мм<sup>2</sup>.

Формула, приведенная в работе [5], относится к стали 09Г2:

$$\delta = -0,23HB + 67,6, \quad \%, \quad (4)$$

где  $HB$  – твердость по Бринеллю.

Из формул (3), (4) следует, что пластичность выражается величиной, обратно пропорциональной статической твердости, величина которой отражает и прочностные свойства материала. Если сопоставлять формулы (1), (2) с (3), (4), то можно сделать вывод, что они содержат принципиально разные подходы к оценке пластичности. В первом случае усилие, прикладываемое к образцу, не нормируется, а учитывается только пластическая деформация в момент разрыва образца, в то время как во втором случае измеряется деформация (в виде площади отпечатка), строго привязанная к заданному усилию вдавливания.

В развитие методов индентирования для определения пластичности в работах [3, 6] было предложено использовать для ее оценки отношение величины пластической деформации к общей деформации в отпечатке испытуемого материала, образованном вдавливаем пирамиды:

$$\delta = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_t} = 1 - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_t}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_p$ ,  $\varepsilon_e$  и  $\varepsilon_t$  – соответственно пластическая, упругая и общая деформации в отпечатке.

Рассчитанные при таком подходе величины  $\delta$  [3] не соответствуют значениям, получаемым по формулам (1)–(4). Так, пластичность металлов с решетками ОЦК, ГЦК и ГПУ будет находиться в пределах 0,95–0,99, а хрупкие материалы будут иметь пластичность в районе 0,3–0,5. Это обусловлено тем, что использование острого индентора-пирамиды приводит к образованию относительно большой доли пластической деформации в отпечатке при испытании металлов. Этим затрудняется возможность оценки изменений пластичности металлов, однако применение такого индентора удобно для испытаний хрупких неметаллических соединений.

В настоящей работе предлагается использовать для оценки пластичности метод динамического индентирования (МДИ) сферическим индентором. МДИ максимально удобен для испытания металлов, поскольку позволяет использовать индентор с разным радиусом наконечника и изменять энергию удара. Это дает возможность получить более приемлемые соотношения величин пластической и упругой деформации в отпечатке для повышения чувствительности к изменению пластических свойств металлов. Кроме того, реализация МДИ позволяет полностью автоматизировать процесс измерений и проводить измерения непосредственно на изделиях без ущерба для их эксплуатационных характеристик.

Для определения пластичности использовали прибор, схема которого показана на рис. 1. Датчик прибора включает механизм разгона индентора, а входящая в состав датчика видеокамера дает возмож-



Рис. 1. Схема прибора динамического индентирования

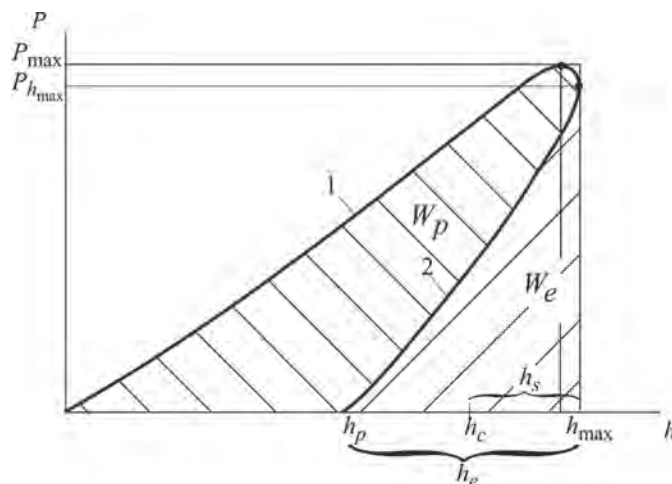


Рис. 2. Типичная диаграмма динамического вдавливания индентора в упругопластический материал:  $W_p$ ,  $W_e$  – соответственно пластическая и упругая составляющие работы динамического вдавливания; 1 – стадия нагружения; 2 – стадия разгрузки

ность провести его позиционирование для нанесения индентором удара в заданную точку материала. При падении индентора во время контакта с испытуемым материалом производится регистрация скорости перемещения индентора, измерение которой с последующим интегрированием и дифференцированием позволяет получить значения перемещения и контактного усилия соответственно. Индентор прибора был изготовлен из карбида вольфрама, модуль упругости которого равен 710 ГПа, а твердость – свыше 1600 HV. Масса индентора составляла 4,3 г, диаметр сферического наконечника  $D = 2,3$  мм, предударная скорость индентора при измерениях – около 0,9 м/с.

С помощью разработанного прибора по данным одного удара можно получить полный цикл нагружения – силовую диаграмму «контактное усилие – глубина вдавливания индентора». Типичный вид диаграммы при испытании упругопластического материала показан на рис. 2. Диаграмма включает стадию нагружения, на которой глубина внедрения увеличивается, и стадию разгрузки, на которой происходит восстановление упругих деформаций, запасенных в материале на стадии нагружения. Как видно из рисунка, по диаграмме можно непосредственно определить значения пластической  $h_p$ , упругой  $h_e$  и максимальной  $h_{\max}$  глубин вдавливания индентора.

Так же, как и в работе [3], пластичность будем определять по формуле (5). Для выражения деформации при внедрении сферического индентора воспользуемся рекомендациями Тейбора [7], в соответствии с которыми общая деформация  $\varepsilon_t$  в отпечатке (рис. 3) в момент достижения максимальной глубины вдавливания  $h_{\max}$  будет равна:

$$\varepsilon_t = 0,2 \frac{d_c}{D}, \quad (6)$$

где  $d_c$  – контактный диаметр пластического отпечатка;  $D$  – диаметр сферического наконечника индентора.

После завершения удара и восстановления упругих деформаций в отпечатке остается пластический отпечаток глубиной  $h_p$ , диаметр проекции которого остается равным контактному диаметру  $d_c$ , а диаметр сферы, которой может быть описан отпечаток в испытуемом металле, становится равным  $D_1$ . Диаметр  $D_1$  всегда больше, чем диаметр сферического наконечника индентора  $D$  (рис. 3).

По аналогии с предыдущей формулой выражение для пластической деформации будет

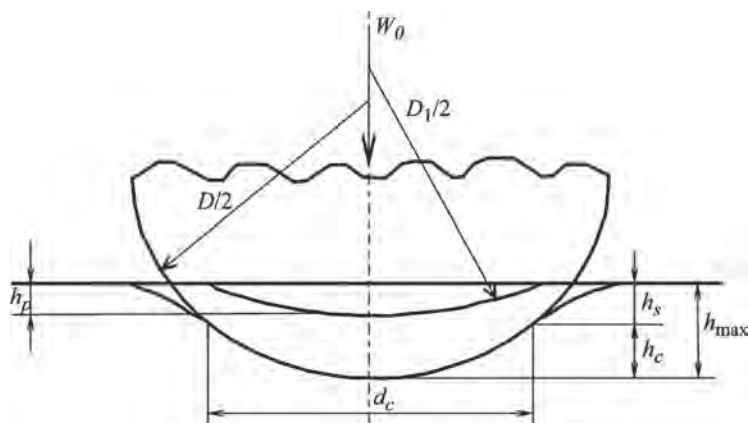


Рис. 3. Схематическое представление поперечного сечения отпечатка при деформировании материала сферическим индентором

$$\varepsilon_p = 0,2 \frac{d_c}{D_1}. \quad (7)$$

Найдем выражение, связывающее  $D$  и  $D_1$ , используя геометрическое соотношение между  $d_c$  и контактной глубиной  $h_c$ . Для момента, соответствующего максимальному контактному усилию  $P_{\max}$ , можно записать:  $d_c = 2\sqrt{Dh_c}$ . После завершения удара контактный диаметр будет равен:  $d_c = 2\sqrt{D_1h_p}$ . Откуда

$$D_1 = D \frac{h_c}{h_p}. \quad (8)$$

Подставляя  $D_1$  в формулу (7), получаем выражение для пластической деформации:

$$\varepsilon_p = 0,2 \frac{d_c}{D} \frac{h_p}{h_c}. \quad (9)$$

Совместное решение выражений (6) и (9) дает формулу для расчета динамической пластичности  $\delta_d$  посредством значений глубин вдавливания:

$$\delta_d = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_t} = \frac{h_p}{h_c}. \quad (10)$$

Полученная для  $\delta_d$  формула, по своей сути, аналогична формуле (5), полученной авторами [3] для пирамидального индентора при статическом вдавливании, однако измеряемые деформации будут существенно отличаться вследствие использования сферического наконечника и влияния скорости деформации на пластическую составляющую глубины вдавливания.

Выражая  $h_c$  через максимальную глубину вдавливания [7], получаем

$$\delta_d = \frac{h_p}{h_{\max} - 0,5h_e}. \quad (11)$$

Формула (11) удобна для использования, поскольку все параметры для определения пластичности  $\varepsilon_d$ , входящие в формулу, берутся непосредственно из диаграммы динамического вдавливания (см. рис. 2).

Эксперименты по определению пластичности проводили на стальных образцах с различной термообработкой, образцах из алюминия и меди (с разной степенью прокатки), титана, вольфрама и их сплавов. На рис. 4 показана зависимость  $\delta_d$  от динамической твердости этих материалов  $H_d$  и статической твердости НВ. Значение  $H_d$  рассчитывали как отношение  $P_{\max}$  к площади проекции контактного отпечатка [8]:

$$H_d = \frac{P_{\max}}{\pi D (h_{\max} - 0,5h_e)}. \quad (12)$$

Значения твердости НВ в верхнем диапазоне получены из значений HRC пересчетом согласно [9].

Из данных, приведенных на рисунке, следуют два основных вывода: для изученных материалов определяемая по формуле (10) пластичность уменьшается с увеличением динамической или статической

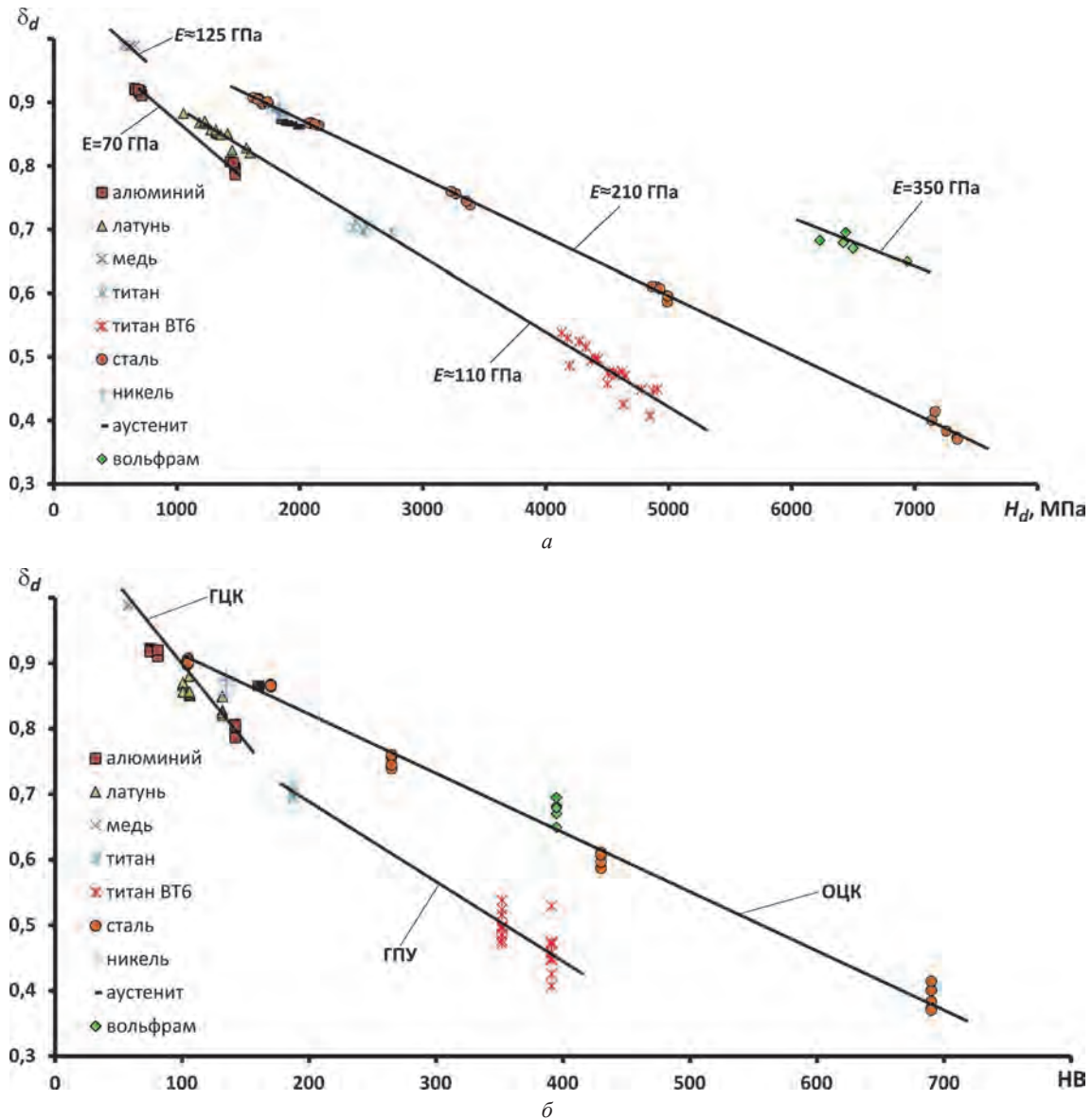


Рис. 4. Зависимость пластичности, определенной по формуле (11), от динамической (а) и статической (б) твердости для различных металлов и сплавов

твердости. Единой зависимости  $\delta_d$  от твердости для разных материалов не существует. На зависимость  $\delta_d = f(H_d)$  влияет модуль упругости материала  $E$ . Если говорить о зависимости пластичности от статической твердости, то более заметным становится влияние типа кристаллической решетки.

В то же время, если обратиться к формулам (1) и (2), то величина  $\delta$ , рассчитанная по ним, не зависит от  $E$ . Исходя из этого, для сравнения величин  $\delta_d$  и получения единой зависимости  $\delta_d$  для различных материалов в формулу (11) был введен коэффициент  $K$ , осуществляющий привязку показаний  $\delta_d$  к значению модуля упругости алюминия, как конструкционного материала, обладающего наименьшим модулем упругости:

$$K = \frac{\delta_{d(Al)} - \delta_{d(M)}}{1 - E_{(M)} / E_{(Al)}}. \quad (13)$$

В реальной конструкторской практике металлы с меньшим модулем упругости (например, свинец) для изготовления несущих элементов практически не используются.

В данной формуле индексы (М) и (Al) определяют принадлежность величин к алюминию или исследуемому материалу соответственно. Среднее значение  $K$ , полученное по этой формуле, для изученных материалов составило 0,1.

С учетом поправки уравнение (11) перепишем в виде:



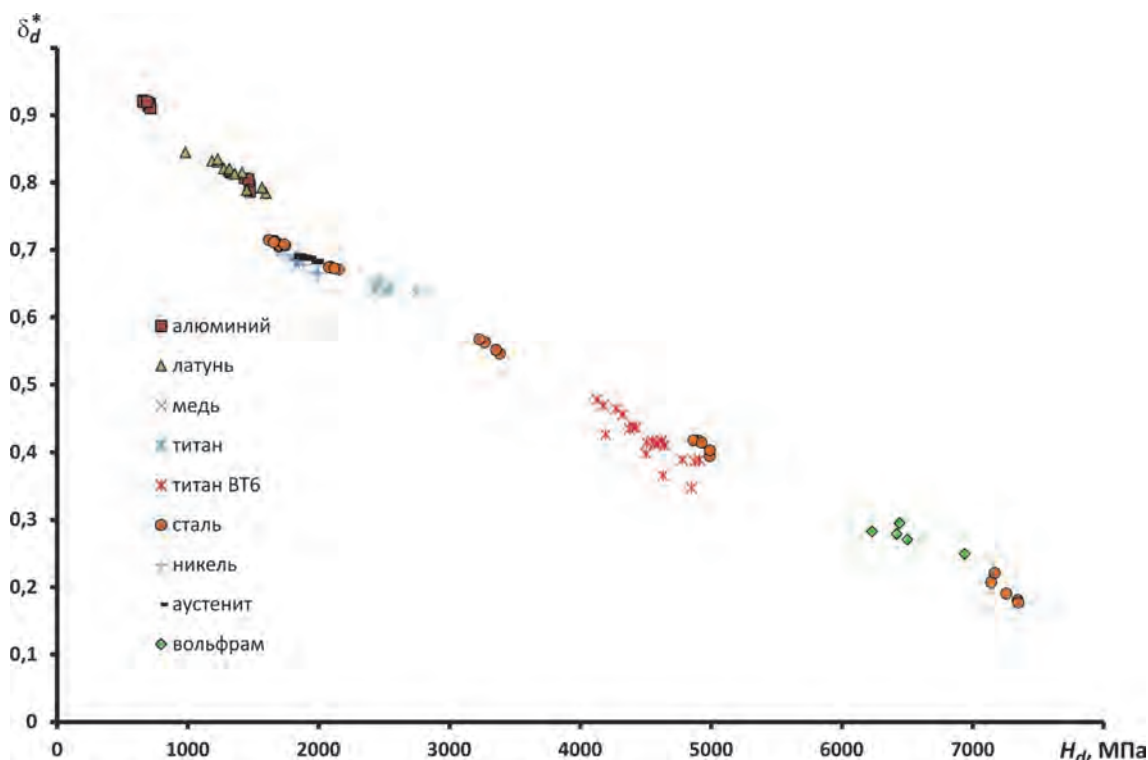


Рис. 5. Зависимость пластичности, определенной по формуле (14), от динамической твердости для различных металлов и сплавов

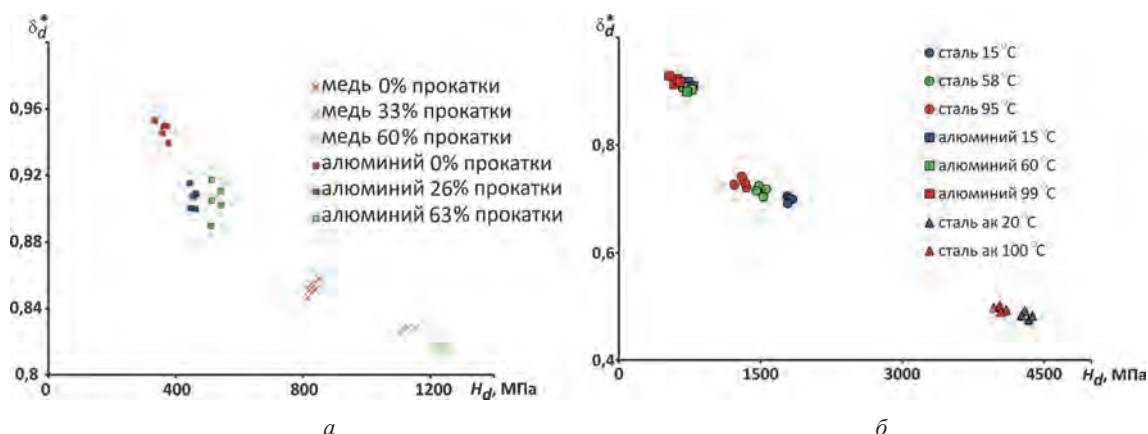


Рис. 6. Влияние степени прокатки (а) и температуры (б) на величину  $\delta_d^*$

$$\delta_d^* = \frac{h_p}{h_{\max} - 0,5h_e} + K \left( 1 - \frac{E_{(M)}}{E_{(Al)}} \right). \quad (14)$$

На рис. 5 показана экспериментальная зависимость величины пластичности, определенная по формуле (14), от динамической твердости при  $K = 0,1$  в виде одной усредненной прямой с некоторыми отклонениями, обусловленными различными скоростями деформации и свойствами поверхностных слоев.

Полученная зависимость  $\delta_d^*$  дает возможность определять пластичность как непосредственно по формуле (13), так и по величине динамической твердости  $H_d$ .

Для установления чувствительности предложенного метода было изучено влияние температуры и пластического деформирования материала, осуществляемого путем прокатки, на величину  $\delta_d^*$  (рис. 6).

Зависимости, приведенные на рисунке, совпадают с общей зависимостью (см. рис. 5), которая также хорошо согласуется с известными данными. Так, из рис. 5 видно, что пластичность чистого титана почти в 2 раза превышает пластичность деформированного титанового сплава ВТ-6, что полностью соответствует данным [10]. Пластичность чистой меди существенно превышает пластичность ее сплава – латуни. Термообработка углеродистых сталей в значительной степени влияет на пластичность, понижая ее

с ростом твердости, а повышение температуры (рис. 6) увеличивает значения  $\delta_d^*$ . Опыты, проведенные на алюминии с разной степенью прокатки, показали, что  $\delta_d^*$  снижается, что вполне естественно, поскольку при таком виде обработки запас пластичности также уменьшается.

Таким образом, предложен новый метод определения пластичности по отношению глубины пластического вдавливания к контактной глубине в отпечатке с отстройкой от влияния модуля упругости материала. Метод является неразрушающим, основан на использовании динамического индентирования, предусматривающего регистрацию кривой нагружения, и показал свою эффективность и чувствительность при определении пластических свойств металлов и сплавов. Определяемая характеристика пластичности имеет диапазон изменения для металлических материалов от 0,9 для чистой меди до 0,18 для стали твердостью 62,2 HRC. Метод позволяет оценивать запас пластичности в изделиях, подвергающихся технологическим или эксплуатационным пластическим деформациям, а также температурному воздействию.

### Литература

1. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 1986-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1986. 35 с.
2. Ахметов Т. А. Применение устройства для повышения пластических свойств холоднодеформированной арматуры / Т. А. Ахметов, Ю. Л. Бобарикин, Я. В. Чикишев и др. // Литье и металлургия. 2016. № 2. С. 64–68.
3. Мильман Ю. В. Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования / Ю. В. Мильман, С. И. Чугунова, И. В. Гончарова // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2011. № 4. С. 182–187.
4. Дрозд М. С. Определение механических свойств металла без разрушения / М. С. Дрозд. М.: Металлургия, 1965. 171 с.
5. Геллер А. Л. О возможности оценки качества металлургической продукции с помощью чисел твердости / А. Л. Геллер // Заводская лаборатория. 1970. № 12. Т. 36. С. 1514.
6. Milman Yu. V. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement (overview N 107) / Yu. V. Milman, B. A. Galanov, S. I. Chugunova // Acta Met. and Mater. 1993. Vol. 41, No 9. P. 2523–2532.
7. Tabor D. The Hardness of Metals / D. Tabor. London: Oxford University Press, 1951. 173 p.
8. Oliver W. C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Res. 2004. Vol. 19. No 1. P. 4–20.
9. ASTM E140-12b1. Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
10. ГОСТ 26492-85. Прутки катаные из титана и титановых сплавов. Введ. 1987-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1985. 31 с.

### References

1. GOST 1497-84. *Metally. Metody ispytaniy na rastjazhenie* [State Standart 1497–84. Metals. Methods of tension test]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1986. 35 p.
2. Ahmetov T. A. [and etc.] *Primenenie ustrojstva dlja povyshenija plasticheskikh svojstv holodnodeformirovannoj armatury* [Use of the device to increase the plastic properties of cold-shaped fittings]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2016, no. 2, pp. 64–68.
3. Milman Yu. V., Galanov B. A., Chugunova S. I. *Harakteristika plastichnosti, opredeljaemaja metodom indentirovaniya* [Plasticity characteristic obtained by indentation]. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: Fizika radiacionnyh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie = Questions of atomic science and technique. Series Physics of radiation damages and radiation materials science*, 2011, no. 4, pp. 182–187.
4. Drozd M. S. *Opreделение mehanicheskikh svojstv metalla bez razrushenij* [Non-destructive determination of the mechanical properties of metal]. Moscow, Metallurgija Publ., 1965. 171 p.
5. Geller A. L. *O vozmozhnosti ocenki kachestva metallurgicheskoy produkcii s promoshh'ju chisel tverdosti* [Estimation of the quality of metallurgical production using hardness]. *Zavodskaja laboratorija = Factory laboratory*, 1970, no. 12, vol. 36, pp. 1514.
6. Milman Yu. V., Galanov B. A., Chugunova S. I. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement (overview N 107). *Acta Met. and Mater.*, 1993, no. 9, vol. 41, pp. 2523–2532.
7. Tabor D. *The Hardness of Metals*. London: Oxford University Press, 1951. 173 p.
8. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *J. Mater. Res.*, 2004, no.1, vol.19, pp. 4–20.
9. ASTM E140-12b1. Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
10. GOST 26492-85. *Prutki katanye iz titana i titanovykh splavov* [State Standart 26492–85. Titanium and titanium alloys rolled bars. Specification]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1985. 35 p.