



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-84-90>
УДК 531.7; 539.5

Поступила 14.03.2022
Received 14.03.2022

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ИХ ДИНАМИЧЕСКОМ И СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ПИРАМИДОЙ ВИККЕРСА

А. П. КРЕНЬ, Институт прикладной физики НАН Беларуси,
г. Минск, ул. Академическая, 16. E-mail: alekspk@mail.ru

В работе рассмотрена возможность оценки пластичности алюминиевых сплавов и алюмоматричных композитов методом квазистатического и микроударного индентирования при предударных скоростях в диапазоне 1–3 м/с. Предложено использовать при испытаниях пирамидальный индентор Виккерса, позволяющий создать постоянную величину деформации. Установлены характерные значения пластичности для промышленных алюминиевых сплавов и алюмоматричных композитов системы Al-Fe-Cr $\delta=0,83-0,98$. Показано влияние скорости деформации на коэффициент динамичности K_d , представляющий собой отношение динамической и статической твердости. Установлено, что увеличение K_d для алюмоматричных композитов более значительно, чем для других материалов. При этом известное выражение, связывающее пластичность с другими механическими характеристиками (твердостью HV и модулем упругости E), для исследованных алюмоматричных композитов не выполняется. Разность значений δ , рассчитанная исходя из параметров отпечатка и как функции E/HV, может служить дополнительным признаком атипичности поведения материалов при деформировании.

Ключевые слова. Индентирование, пластичность, алюминий, скорость деформации.

Для цитирования. Крень, А. П. Измерение пластичности алюминиевых сплавов при их динамическом и статическом нагружении пирамидой Виккерса / А. П. Крень // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 84–90. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-84-90>.

MEASUREMENT OF ALUMINUM ALLOYS PLASTICITY UNDER THEIR DYNAMIC AND STATIC LOADING BY THE VICKERS PYRAMID

A. P. KREN, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, 16, Akademicheskaya str. E-mail: alekspk@mail.ru

The paper considers the possibility of assessing the plasticity of aluminum alloys and aluminum matrix composites by the method of quasi-static and micro-impact indentation at pre-impact velocities in the range of 1–3 m/s. It is proposed to use a pyramidal Vickers indenter for testing, which allows creating a constant amount of deformation. The characteristic plasticity values for industrial aluminum alloys and aluminum matrix composites of the Al-Fe-Cr system $\delta=0.83-0.98$ are established. The influence of the deformation rate on the dynamicity coefficient K_d , which is the ratio of dynamic and static hardness, is shown. It was found that the increase in K_d for aluminum matrix composites is more significant than for other materials. At the same time, the well-known expression linking plasticity with other mechanical characteristics: hardness HV and modulus of elasticity E, is not fulfilled for the studied aluminum matrix composites. The difference in the values of δ , calculated based on the parameters of the print and as a function of E/HV, can serve as an additional sign of the atypical behavior of materials during deformation.

Keywords. Indentation, plasticity, aluminum, deformation rate.

For citation. Kren A. P. Measurement of aluminum alloys plasticity under their dynamic and static loading by the Vickers pyramid. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 2, pp. 84–90. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-84-90>.

Введение

Характеристика пластичности δ [1–3] прочно вошла в перечень параметров, определяемых методами индентирования [4–5] наряду с такими, как твердость, модуль упругости, коэффициент деформационного упрочнения и др. Ее физический смысл в корне отличается от пластичности δ_5 , измеряемой при растяжении образцов. Величина δ_5 может рассматриваться как частный случай, поскольку характеризует пластичность при растяжении в условиях, когда образец полностью разрушается. В то время как δ определяет способность материала принимать определенную форму. При этом, как было показано ранее [6], δ является характеристикой, на которую может оказывать влияние ряд факторов: значение деформации ϵ

и скорости деформации $\dot{\epsilon}$, вид кристаллической решетки, величина модуля упругости E материала. В большинстве случаев измерение этого параметра производили только для квазистатического вдавливания пирамидального индентора [7], для которого величина деформации остается постоянной, а скорость деформации составляет около 10^{-2} с^{-1} . В то же время при обработке металлов динамические нагрузки являются преобладающими, поэтому изучение способности материалов пластически деформироваться при ударных воздействиях является актуальным направлением исследований. Особый интерес представляет получение сведений о пластичности при изучении алюмоматричных композитов (АМК), которые благодаря низкому удельному весу, высокой коррозионной стойкости, отсутствию ферромагнетизма и достаточно высокому уровню механических свойств (с прочностью 500–600 МПа и $\delta_5=3\text{--}5\%$) находят широкое применение в авиационной и ракетно-космической отрасли. В связи с этим целью настоящей работы являлось установление характерных значений δ для алюминиевых сплавов, в том числе АМК, а также определение возможности ее измерения при ударном микроиндентировании.

Теоретические данные

Определение характеристики пластичности δ как отношения пластической деформации к общей было введено в [1–3]:

$$\delta = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_t} = 1 - \frac{\epsilon_e}{\epsilon_t}, \quad (1)$$

где ϵ_p , ϵ_e и ϵ_t – соответственно пластическая, упругая и общая деформации.

Такая характеристика может измеряться при любом виде деформации. Если принять во внимание закон Гука и переписать данное уравнение для случая одноосного растяжения, то получим:

$$\delta = 1 - \frac{\sigma}{\epsilon_t E}, \quad (2)$$

где σ – напряжение течения; E – модуль упругости. Из этого уравнения следует, что δ зависит от величины общей деформации. И для того чтобы получить сопоставимые данные, необходимо, чтобы величина деформации была постоянной, при этом ее большая часть должна быть пластической. Это условие достигается при испытании материалов методом индентирования с использованием конического или пирамидального индентора. Если учесть, что состояние полной пластичности наступает при деформациях более 4% [8], то применение для испытаний стандартного индентора в виде пирамиды Виккерса становится наиболее оптимальным. Создаваемая таким индентором деформация будет постоянной и равной 8% [9].

Для индентора Виккерса также была получена теоретическая зависимость:

$$\delta = 1 - 14,3(1 - \nu - 2\nu^2) \frac{HV}{E}, \quad (3)$$

где ν – коэффициент Пуассона; HV – твердость по Виккерсу.

Уравнение (3) было проверено на широком круге материалов [2] и показало достаточно хорошую сходимость для различных металлов и сплавов. В то же время процессы деформирования АМК имеют ряд особенностей [10, 11], которые влияют на значение измеряемых физико-механических характеристик, и для них это уравнение нуждается в проверке.

При индентировании величина δ определяется на основании параметров отпечатка (рис. 1, а, б) и данных диаграммы нагружения (рис. 1, в, г), представляющей собой зависимость «контактное усилие P – глубина вдавливания h »:

$$\delta = \frac{h_p}{h_{\max}}, \quad (4)$$

где h_p – глубина остаточного отпечатка; h_{\max} – максимальная глубина внедрения.

При нагружении индентор внедряется на глубину h_{\max} . При этом упругопластический контакт происходит по диагонали $d_{\text{уп}}$. При разгрузке упругие деформации восстанавливаются, величина пластической деформации характеризуется глубиной пластического отпечатка h_p и величиной навала h_n , который в наших измерениях отсутствовал. Также известно, что размер диагоналей, определяющих контактную поверхность отпечатка, до и после нагрузки практически совпадает $d_{\text{уп}} = d_{\text{пл}}$ [12]. Диаграммы для динамического и статического индентирования имеют определенные различия (рис. 1, в, г). При динамическом нагружении время достижения максимального усилия P_{\max} и максимального внедрения h_{\max} не совпадает.

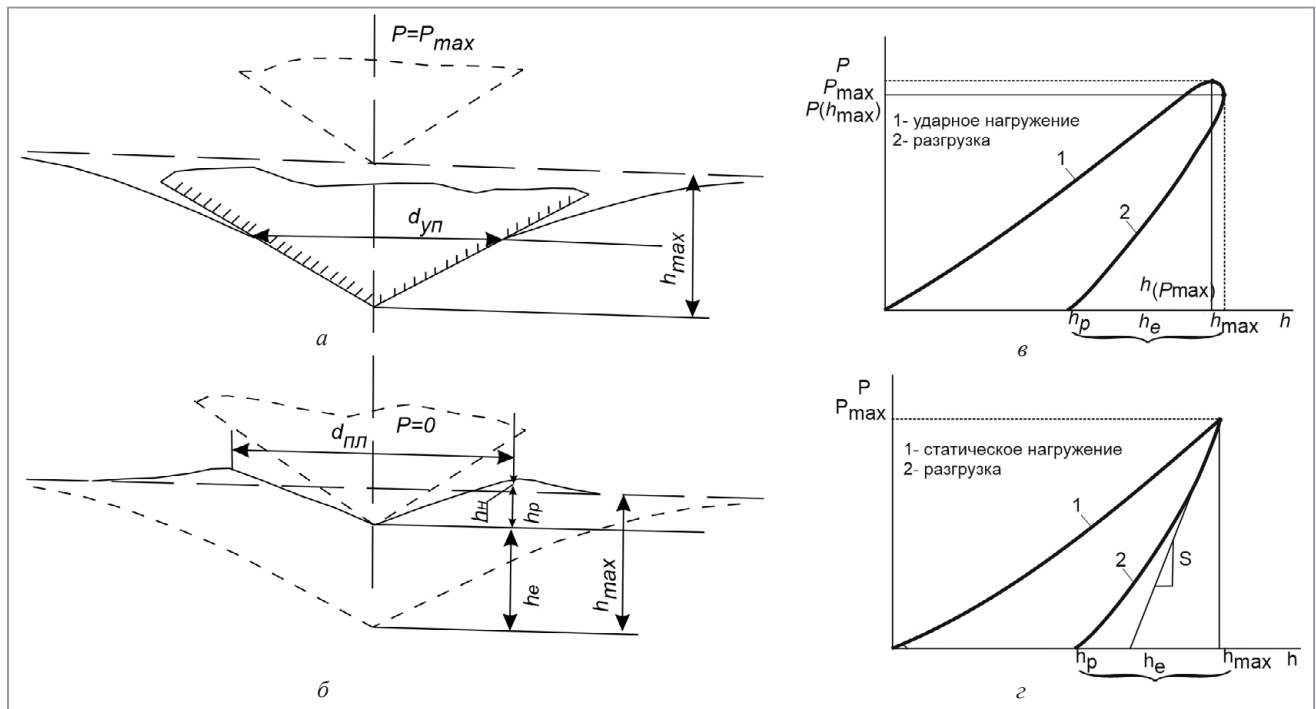


Рис. 1. Схема внедрения пирамиды Виккерса в материал в сечении, совпадающем с диагональю (*a* – под нагрузкой; *b* – после снятия нагрузки), и диаграммы динамического (*e*) и статического (*z*) нагружения

Для вычисления HV и E можно воспользоваться методикой, приведенной в ISO 14577-1:2015. Однако опыт показывает, что определение входящей в расчет E и HV величины S (рис. 1, *z*) – касательной к ветви разгрузки в верхней ее точке, обладает субъективностью. Это вносит существенную неопределенность в результат расчета. Кроме того, для ударного индентирования, алгоритм, описанный в ISO 14577-1:2015, не может быть соблюден в силу наличия временного сдвига между моментом достижения P_{max} и h_{max} . Поэтому для расчета E применим методику, приведенную в [13], а твердость определим на основании оптического измерения отпечатков с помощью микроскопа. Такой подход оптимален еще и по той причине, что падение индентора должно происходить строго перпендикулярно поверхности. Из диаграммы $P - h$ установить это невозможно, поэтому использование оптических методов измерений для определения размеров отпечатка более оправдано.

В [13] показано, что с использованием параметров индентирования HV и E могут быть определены по выражениям:

$$HV = \frac{1,854P_{max}}{d_{пл}^2}. \quad (5)$$

Эффективный модуль Юнга E_3 контактной пары материал-индентор будет определяться по выражению [13]:

$$E_3 = \frac{1,31P_{max}Nctg\gamma}{h_{max}h_e}. \quad (6)$$

Здесь $N = h_{max}(h_e + 1,35h_p)^{-1} = \frac{h_{max}}{h_e} \left[1 + 1,35 \left(\frac{h_{max}}{h_e} - 1 \right) \right]^{-1}$; $\gamma = 136^\circ$ – угол между гранями индентора Виккерса.

Модуль упругости материала рассчитаем согласно [12]:

$$E = \frac{E_3}{1 - \nu^2}. \quad (7)$$

Оборудование и материалы

В качестве материалов для изучения были взяты промышленно-выпускаемые алюминиевые сплавы, а также образцы алюминия, наполненного наноквазикристаллами (см. таблицу).

Материал	HV (5кгс)	Предел текучести σ_T , МПа	δ_5
АК6	88	265	12,2
1915	119	155	11,7
АМц	133	187	7,1
АМгН2	160	212	6,0
В95	184	407	5,3
$Al_{94}Fe_{4,1}Cr_{1,3}Ti_{0,6}$	182	647	3,7
$Al_{93}Fe_3Cr_3Ti_1$	150	536	2,8
$Al_{93}Fe_3Cr_3Ti_{0,5}Zr_{0,5}$	200	675	1,1

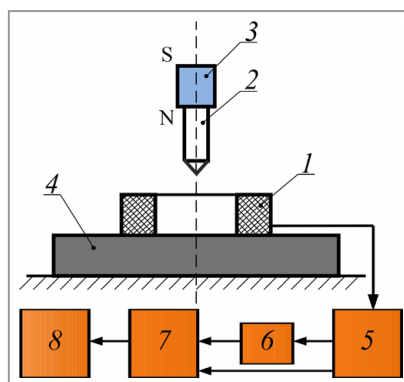


Рис. 2. Схема экспериментальной установки динамического индентирования для определения твердости металлов: 1 – катушка индуктивности; 2 – индентор; 3 – постоянный магнит; 4 – образец; 5 – предварительный усилитель; 6 – блок синхронизации; 7 – аналого-цифровой преобразователь; 8 – устройство вывода информации

Все измерения проводили одним и тем же индентором Виккерса тип НПМ, изготовленным по ГОСТ 9377-81, используемым при измерении микротвердости. Результаты статических измерений и образцы АМК были представлены Институтом проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. Ударное микроиндентирование проводили на установке, разработанной в ИПФ НАН Беларуси (рис. 2). Индентор сбрасывали в стеклянной трубке. Сигнал, пропорциональный скорости движения индентора, измеряли с помощью катушки индуктивности, усиливали и далее обрабатывали по разработанным алгоритмам для получения диаграммы $P-h$.

Результаты эксперимента и их анализ

Измерение характеристик материалов при ударе осуществляли при нескольких предупредных скоростях в диапазоне 1–3 м/с. Типичные диаграммы внедрения показаны на рис. 3. Из рисунка видно практически полное отсутствие влияния скорости нагружения на ход кривой индентирования для алюминиевого сплава АК6 твердостью 88 HV: зависимости для разных скоростей на начальном участке совпадают. Для АМК ($Al_{94}Fe_{4,1}Cr_{1,3}Ti_{0,6}$) можно отметить влияние скорости деформации, выражающееся в расхождении кривых: зависимости, полученные с большей скоростью, проходят друг над другом не сливаясь, в отличие от предыдущего образца.

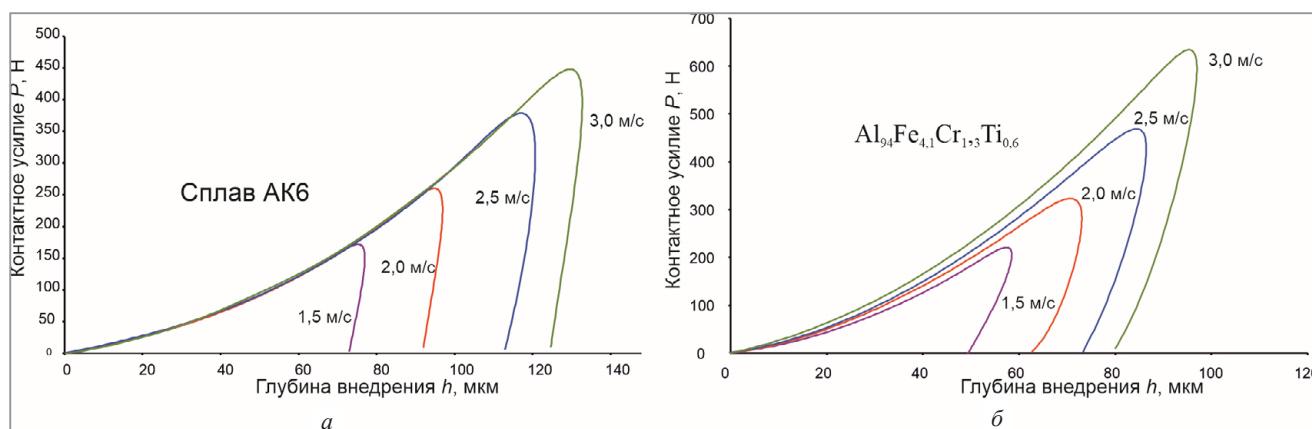


Рис. 3. Диаграммы внедрения пирамиды Виккерса в различные материалы: а – АК6; б – $Al_{94}Fe_{4,1}Cr_{1,3}Ti_{0,6}$

Расчет твердости по Виккерсу выполняли по формуле (5) исходя из значения силы P_{\max} , достигнутой при ударном контакте, и измеренных параметров отпечатка (рис. 4).

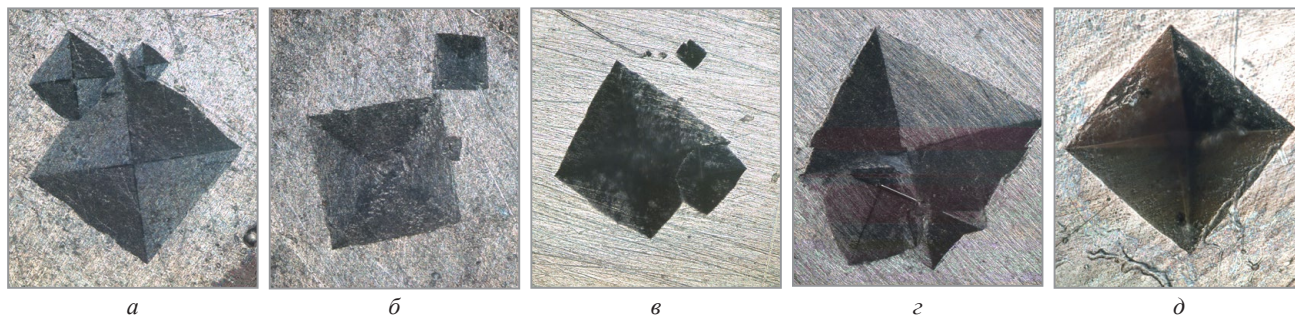


Рис. 4. Характерные отпечатки, полученные при динамическом (а–с) и статическом (д) индентировании

Четкая, ровная форма отпечатка (рис. 4, а, б) свидетельствовала о перпендикулярном падении индентора на образец, подобно тому, как внедряется индентор при статических измерениях (рис. 4, д). Отпечатки, имеющие вид (рис. 4, в, з), исключались из расчетов. На рисунках также видны отпечатки меньшего размера, находящиеся рядом с основным. Эти отпечатки образовывались после повторных соударений индентора и образца и для получения данных о поведении материала не использовались.

Результаты измерения твердости образцов при ударном и статическом нагружении показаны на рис. 5. Как видно из рисунка, для промышленно-выпускаемых сплавов алюминия практически отсутствует чувствительность твердости к скорости деформации. Коэффициент динамичности K_d , представляющий собой отношение твердости HV, полученной при статическом внедрении и динамическом вдавлении с максимальной предупредной скоростью 3 м/с, не превышает 1,1. В то же время для АМК K_d возрастает до 1,55. При этом заметного изменения модуля упругости, рассчитанного по формуле (6), не наблюдалось. Размах значений E составлял $71,7 \pm 3$ ГПа (рис. 5).

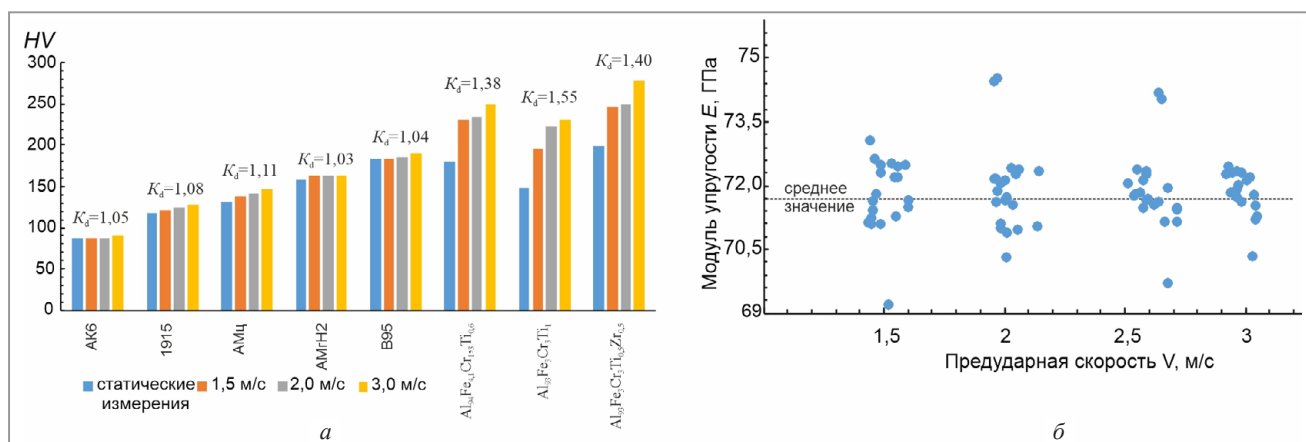


Рис. 5. Результаты измерения твердости (а) и модуля упругости (б)

Получение диаграмм нагружения, определение твердости и модуля упругости дает возможность перейти к независимому определению характеристики пластичности δ по формулам (3), (4). На рис. 6, а показана связь, которая для промышленных алюминиевых сплавов является линейной, а пластичности, определенные обоими способами по данным динамического индентирования, практически равны. В то же время точки, соответствующие АМК, не принадлежат общей зависимости. Более детально это можно проанализировать, если построить график пластичности, как функции $(1 - \nu - 2\nu^2) \frac{HV}{E}$ (рис. 6, б).

Из рис. 6, б также видно, что значения для АМК не лежат на общей теоретической зависимости. При этом пластичность для промышленных сплавов, определенная при ударе и статических измерениях, почти совпадает по своим значениям. Это можно объяснить тем, что прочность АМК на основе системы Al-Fe-Cr обеспечивается высокой твердостью и высоким модулем упругости квазикристаллов, а достаточно высокая пластичность обуславливается особым механизмом деформации: в процессе нагружения сплавов этой системы происходит релаксация напряжений в деформированном слое, а пластичность при разрыве δ_5 возрастает до уровня 3–5%. При ударном нагружении это выражается в том, что,

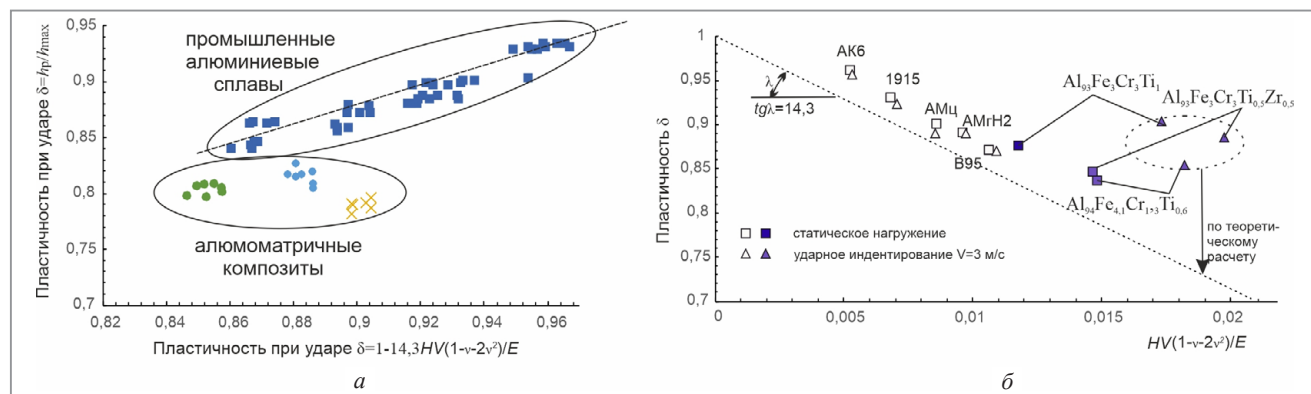


Рис. 6. Соотношение между пластичностью δ , рассчитанной по формулам (3), (4) (а),

и зависимость пластичности от параметра $(1 - \nu - 2\nu^2) \frac{HV}{E}$ (б)

несмотря на резкий рост твердости, пластичность остается достаточно высокой по отношению к той (рис. 6, б), которая должна была бы получиться согласно расчету исходя из значений HV и E.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения динамического индентирования для оценки пластичности различных материалов: оно обладает большей чувствительностью к изменению характера деформирования материалов и изменению их свойств. Как видно, введение квазикристаллов позволило значительно увеличить динамическую пластичность материала, в то время как пластичность, измеренная при статическом внедрении, увеличилась незначительно.

Разность значений δ , полученных при различных скоростях деформирования (в статическом и ударном режиме), может служить дополнительным диагностическим признаком при оценке качества материалов.

Выводы

Установлены характерные значения пластичности для алюминиевых сплавов $\delta=0,83-0,98$. Показано влияние скорости и механизма деформации на величину пластичности, проявляющееся как в резком повышении коэффициента динамичности $K_d=1,38-1,55$, так и отклонении значений пластичности от теоретически рассчитанных. При этом общепринятое уравнение, связывающее пластичность с другими механическими характеристиками, для АМК не выполняется. Это позволяет утверждать, что разность значений δ , рассчитанной исходя из параметров отпечатка и как функции E/HV при динамическом индентировании, может служить дополнительным характерным признаком при получении материалов, обладающих улучшенными свойствами.

Достаточно простая реализация динамического микроиндентирования также обладает преимуществом при создании диагностического оборудования. Измерить пластичность при статическом нагружении довольно сложно: требуется тщательная подготовка поверхности образцов, соблюдение жесткости силовой системы при нагружении и др. В то время как при ударе значительные деформации достигаются уже при скоростях 1 м/с, что позволяет создать портативные переносные приборы контроля на базе разработанной установки. При создании конструкции, обеспечивающей перпендикулярное падение индентора, возможен расчет диагонали отпечатка непосредственно из диаграммы нагружения, что позволит отказаться от оптических измерений и создать портативные измерительные приборы.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т20УКА-002).

ЛИТЕРАТУРА

1. Milman Y.V., Galanov B.A., Chugunova S.I., Plasticity characteristic obtained through hardness measurement. Acta Metal et Mat. 1993.
2. Milman Y.V., Chugunova S.I., Goncharova I.V. Plasticity determined by indentation and theoretical plasticity of materials // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2009. Vol. 73. P. 1215–1222.
3. Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Zhu Y.T., Lowe T.C. Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation // J Mater Res. 2002. Vol. 17. P. 5–8.
4. Рудницкий В.А., Крень А.П., Ланцман Г.А. Оценка пластичности металлических материалов методом динамического индентирования // Литье и металлургия. 2017. № 2. С. 81–87.

5. **VanLandingham M.R.** Review of instrumented indentation // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. July/August 2003. Vol. 108. No 4. P. 249–265.
6. **Kren A.P., Delendik M.N., Machikhin A.S.** Non-destructive evaluation of metal plasticity using a single impact microindentation // *International Journal of Impact Engineering*. 2022. Vol. 162.
7. **Milman Y.V., Chugunova S.I., Goncharova I.V.** Plasticity characteristic obtained by indentation technique for crystalline and noncrystalline materials in the wide temperature range // *High Temp. Mat. and Proc.* 2006. Vol. 25. P. 39–46.
8. **Sinisa Dj Mesarovic Norman Fleck.** Spherical indentation of elastic–plastic solids // *Proceedings of the Royal Society. Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 1999. Vol. 455. No 1987. P. 2707–2728.
9. **Tabor D.** *Hardness of Metals*, Clarendon Press. Oxford, 1951.
10. **Shima Pashangeh, Morteza Alizadeh, Rasool Amini.** Structural and corrosion behavior investigation of novel nano-quasicrystalline Al-Cr-Fe reinforced Al-matrix composites produced by ARB process // *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 890.
11. **Kang N., Mansori M. EL., Lin X.** In-situ synthesis of aluminum/nano-quasicrystalline Al-Fe-Cr composite by using selective laser melting // *Composites Engineering*. 2018. P. 382–390.
12. **Johnson K.L.** *Contact Mechanics*. Cambridge University Press. 1985.
13. **Galanov B.A., Grigor'ev O.N.** Determination of the hardness and young's modulus from the depth of penetration of a pyramidal indenter // *Strength of Materials*. 1983. Vol. 15. P.1624–1628.
14. **Kren A.P.** Determination of the critical stress intensity factor of glass under conditions of elastic contact by the dynamic indentation method // *Strength of Materials*. 2009. Vol. 41. No. 6. P. 628–636.
15. **Kren A.P., Protasenya T.A.** Determination of the physic and mechanical characteristics of isotropic pyrolytic graphite by dynamic indentation method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014. Vol. 50. No. 7. P. 419–425.

REFERENCES

1. **Milman Y.V., Galanov B.A., Chugunova S.I.** Plasticity characteristic obtained through hardness measurement. *Acta Metal et Mat*, 1993, vol. 41, pp. 2523–2532.
2. **Milman Y.V., Chugunova S.I., Goncharova I.V.** Plasticity determined by indentation and theoretical plasticity of materials. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2009, vol. 73, pp. 1215–1222.
3. **Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Zhu Y.T., Lowe T.C.** Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation. *J Mater Res*, 2002, vol. 17, pp. 5–8.
4. **Rudnickij V.A., Kren' A.P., Lancman G.A.** Ocenka plastichnosti metallicheskih materialov metodom dinamičeskogo indentirovanija [Evaluation of Plasticity of Metallic Materials by Dynamic Indentation]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 2, pp.81–87.
5. **VanLandingham M.R.** Review of instrumented indentation. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2003, vol. 108, pp. 249–265.
6. **Kren A.P., Delendik M.N., Machikhin A.S.** Non-destructive evaluation of metal plasticity using a single impact microindentation. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, vol. 162.
7. **Milman Y.V., Chugunova S.I., Goncharova I.V.** Plasticity characteristic obtained by indentation technique for crystalline and noncrystalline materials in the wide temperature range. *High Temp Mat and Proc.* 2006, vol. 25, pp. 39–46.
8. **Sinisa Dj Mesarovic Norman Fleck.** Spherical indentation of elastic–plastic solids. *Proceedings of the Royal Society Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 1999, vol. 455, no. 1987, pp. 2707–2728.
9. **Tabor D.** *Hardness of Metals*. Clarendon Press. Oxford, 1951.
10. **Shima Pashangeh, Morteza Alizadeh, Rasool Amini** Structural and corrosion behavior investigation of novel nano-quasicrystalline Al-Cr-Fe reinforced Al-matrix composites produced by ARB process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 890.
11. **Kang N., Mansori M. EL., Lin X.** In-situ synthesis of aluminum/nano-quasicrystalline Al-Fe-Cr composite by using selective laser melting. *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 155, pp. 382–390.
12. **Johnson K.L.**, *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, 1985.
13. **Galanov B.A., Grigor'ev O.N.** Determination of the hardness and young's modulus from the depth of penetration of a pyramidal indenter. *Strength of Materials*, 1983, vol. 15, pp. 1624–1628.
14. **Kren A.P.** Determination of the critical stress intensity factor of glass under conditions of elastic contact by the dynamic indentation method. *Strength of Materials*, 2009, vol. 41, no. 6, pp. 628–636.
15. **Kren A.P., Protasenya T.A.** Determination of the physic and mechanical characteristics of isotropic pyrolytic graphite by dynamic indentation method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, no. 7, pp. 419–425.