

**ОЦЕНКА ИНДЕКСА ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ
МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ**

Крень А.П.¹, Ланцман Г.А.¹, Делендик М.Н.²

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

²Филиал БНТУ «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров
по менеджменту и развитию персонала»
Минск, Республика Беларусь

Пластичность является важнейшей характеристикой, по которой оценивается способность материалов претерпевать значительную пластическую деформацию перед разрушением.

Как известно, стандартизированной мерой пластичности принято считать относительное удлинение δ_p и относительное сужение ψ , определяемые при разрушении во время испытаний на растяжение на испытательных машинах [1].

Данные показатели определяются разрушающим методом, не относящимся к экспресс-методам, которые крайне необходимы при диагностике технического состояния потенциально опасного промышленного оборудования.

Разработка более оптимальных методов определения пластичности, прежде всего, связана с применением методов индентирования, поскольку твердость H по своей сути представляет собой комплексную механическую характеристику, являющуюся функцией как прочностных, так и пластических свойств материала.

В работах [2–4] впервые было введено понятие и развиты теоретические представления о новой характеристике пластичности δ_H , также называемой индексом пластичности, определяемой при вдавливании в материал алмазной пирамиды Виккерса. Параметр δ_H рассчитывается как отношение величины пластической деформации к общей деформации в отпечатке испытуемого материала, образованном вдавливанием пирамиды.

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

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

Если применяемое оборудование позволяет производить запись кривой нагружения и разгрузки материала в координатах «контактное усилие P – перемещение индентора h », то характеристика пластичности может быть найдена также согласно выражению [5]:

$$\delta_W = \frac{W_p}{W_t} = 1 - \frac{W_e}{W_t}, \quad (2)$$

где W_p , W_e и W_t – соответственно пластическая, упругая и общая работа деформирования материала.

В работе предлагается применить для оценки пластичности метод динамического индентирования (МДИ), который заключается в однократном

микроударном воздействии на материал жестким индентором и регистрации изменения во времени основных параметров ударного контакта (рисунок 1). Основным источником информации о свойствах материала при индентировании является зависимость «контактное усилие P – глубина вдавливания индентора h » (рисунок 1, б).

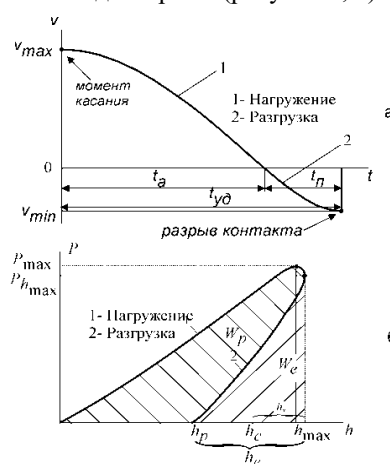


Рисунок 1 – Характерные зависимости, описывающие процесс внедрения индентора в металл:
а – зависимость изменения скорости $V(t)$;
б – изменение контактного усилия от глубины вдавливания $P(h)$

Рассмотрим возможность измерения параметра δ_H при динамическом индентировании сферическим индентором. Пластичность будем определять по формулам (3) и (4). Для выражения деформации воспользуемся рекомендациями Тейбора [6], в соответствии с которыми общая деформация ε_t в отпечатке (рисунок 2) в момент достижения максимальной глубины вдавливания h_{max} будет равна:

$$\varepsilon_t = 0,2 \frac{d_c}{D}, \quad (3)$$

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 .

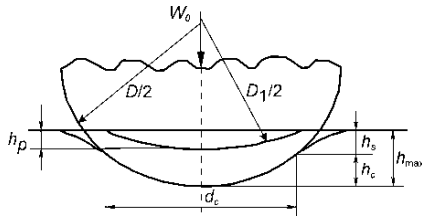


Рисунок 2 – Схематическое представление поперечного сечения отпечатка при деформировании материала сферическим индентором

По аналогии с предыдущей формулой, выражение для пластической деформации будет:

$$\varepsilon_p = 0,2 \frac{d_c}{D_1}. \quad (4)$$

Найдем выражение, связывающее D и D_1 , используя геометрическое соотношение между d_c , и контактной глубиной h_c . Для момента, соответствующему максимальному внедрению h_{max} , для развитых пластических деформаций можно записать: $d_c = 2\sqrt{Dh_c}$. После завершения удара контактный диаметр будет равен: $d_c = 2\sqrt{D_1h_p}$. Откуда:

$$D_1 = D \frac{h_c}{h_p}. \quad (5)$$

Подставляя D_1 в формулу (5) получим выражение для пластической деформации:

$$\varepsilon_p = 0,2 \frac{d_c h_p}{D h_c}. \quad (6)$$

Совместное решение выражений (3), (5) и (8) дает формулу для расчета динамической пластичности δ_H^d посредством значений глубин вдавливания:

$$\delta_H^d = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_t} = \frac{h_p}{h_c}. \quad (7)$$

Выражая h_c через h_{max} : $h_c = h_{max} - 0,5h_e$, получим:

$$\delta_H^d = \frac{h_p}{h_{max} - 0,5h_e}. \quad (8)$$

Если рассматривать формулу (4), то для динамического индентирования ее можно преобразовать в более удобный вид, поскольку известна масса индентора m , его предупредная скорость (скорость в момент касания) V_{max} и скорость отскока (в момент разрыва контакта индентора с образцом) V_{min} . Так, полная энергия удара может быть рассчитана как:

$$W_t = \frac{mV_{max}^2}{2}. \quad (9)$$

Энергия упругого отскока индентора:

$$W_e = \frac{mV_{min}^2}{2}. \quad (10)$$

Энергия пластического деформирования материала:

$$W_p = W_t - W_e. \quad (11)$$

Решая (4), (11)-(13) совместно, получим:

$$\delta_w^d = 1 - \frac{V_{min}^2}{V_{max}^2} = 1 - e^2. \quad (12)$$

где e – коэффициент восстановления скорости.

Эксперименты по определению пластичности с помощью МДИ проводились с различной предупредной скоростью V_{max} в диапазоне 0,4–4 м/с (при этом достигаемая скорость деформации находилась в диапазоне 500–2 500 с⁻¹) на цветных металлах и сталях, имеющих различную твердость.

На рисунке 3 показана связь между параметрами δ_w^d и δ_H^d , которая построена с использованием значений, полученных для всего диапазона изменения V_{max} .

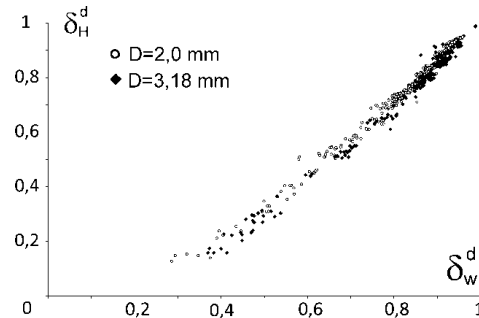


Рисунок 3 – Связь параметров δ_w^d и δ_H^d

Данные расхождения возможно вызваны различными принципами регистрации процесса индентирования, точностью определения параметров внедрения, а также допущениями (о нахождении материала в состоянии полной пластичности), принятыми при расчете d_c .

Исследована возможность определения параметра пластичности МДИ сферическим индентором. Предложены выражения для его определения, позволяющие использовать в расчетах непосредственно данные кривой ударного нагружения. Показана близость значений параметра пластичности, рассчитываемого исходя из глубин внедрения индентора и исходя из энергетических параметров индентирования (через коэффициент восстановления скорости).

Литература

1. ISO 6892-1:2019(en) Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature.
2. Yu.V. Milman, b.A. Galanov, and S.I. Chugunova, Acta Met. Mater., 41, No. 9: 2523 (1993).
3. Yu.V. Milman, S.I. Chugunova, and I.V. Goncharova, High Temp. Mater. Processes, 25, Nos. 1–2: 39 (2006).
4. Y.t. Cheng and C.M. Cheng, Mater. Sci. Eng. R, 44, No. 4: 91 (2004).
5. Yu. V. Milman, S. I. Chugunova, I. V. Goncharova, A. A. Golubenko. Plasticity of Materials Determined by the Indentation Method // Usp. Fiz. Met., 2018, vol. 19, no. 3. DOI: 10.15407/ufm.19.03.271.
6. Tabor D. The Hardness of Metals / D. Tabor. London: Oxford University Press, 1951. – 173 p.