М. М. Матлин, В. А. Казанкин, Е. Н. Казанкина

**ДИАГНОСТИКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА
ПО ПАРАМЕТРАМ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ВНЕДРЕНИЯ
СФЕРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: detmash@vstu.ru, matlin@vstu.ru

В работе описаны неразрушающие методы определения физико-механических свойств металлов, основанные на закономерностях упругопластического внедрения сферического индентора в испытуемый материал. Использование предложенных методов дает возможность построения диаграммы истинных напряжений при растяжении по результатам однократного вдавливания сферического индентора.

Ключевые слова: сферический индентор, неразрушающий контроль, диаграмма истинных напряжений, внедрение, пластическая твердость.

M. M. Matlin, V. A. Kazankin, E. N. Kazankina

**DIAGNOSTICS OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES
OF THE METAL BY THE PARAMETERS OF THE ELASTIC-PLASTIC
INDENTATION OF A SPHERICAL INDENTER**

Volgograd State Technical University

The paper describes non-destructive methods for determining the physical and mechanical properties of metals based on the regularities of elastic-plastic indentation of a spherical indenter into the test material. Using the proposed methods makes it possible to construct a diagram of true tensile stresses based on the results of a single indentation of a spherical indenter.

Keywords: spherical indenter, non-destructive testing, diagram of true stresses, indentation, plastic hardness.

Для определения механических характеристик металлов в основном используют экспериментальное построение кривой деформационного упрочнения [1] путем растяжения образцов. Очевидно, что это разрушающий метод контроля. В тех случаях, когда необходимо диагностировать техническое состояние изделия в процессе эксплуатации или ремонта целесообразно использовать неразрушающие методы контроля. В последнее время достаточное развитие получили методы кинетического индентирования, предусматривающие построение диаграммы внедрения индентора. Так, в работе [2] предложено для построения кривой растяжения использовать зависимость твердости по Бринеллю НВ от отношения диаметра

остаточного отпечатка к диаметру сферического индентора. В работе [3] предложено строить диаграмму условных напряжений растяжения по диаграмме внедрения трехгранного индентора, а в работе [4] описана методика определения предела текучести и пластичности материалов методом индентирования. В работе [5] описан метод, базирующийся на сопоставлении коэффициентов, входящих в уравнения описывающих диаграммы внедрения индентора и растяжения. В работе [6] предложен метод кинетического индентирования конического индентора. В работе [7] показано, что при испытаниях материалов вдавливанием или растяжением имеются общие характерные области деформации и сопротивления нагружению: об-

© Матлин М. М., Казанкин В. А., Казанкина Е. Н., 2020.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00049, и при поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-48-340002, а также в рамках конкурса СП-2018 (СП-253.2018.1)

ласть упругой и область упругопластической деформации, затем область потери устойчивости и область разрушения; сходство диаграмм вдавливания и растяжения подтверждает обоснованность количественной связи характерных точек этих диаграмм. В работе [8] предложен метод определения пластичности металлов по графику зависимости глубины внедрения сферического индентора от динамической контактной нагрузки. В работе [9] описан метод неразрушающего контроля модуля нормальной упругости и динамической твердости для широкого класса материалов от металлов до полимеров путем динамического индентирования с построением диаграммы вдавливания (сферического, конического, пирамидального или клинового индентора из карбида вольфрама) в координатах контактное усилие – глубина вдавливания.

Построение диаграмм вдавливания индентора предполагает дополнительное использование специального оборудования. В связи

с этим ниже изложены методы [10, 11] определения координат характерных точек на диаграмме растяжения по параметрам упругопластического внедрения сферического индентора. При этом строили диаграмму в координатах относительное сужение – истинные напряжения. Ординаты истинной диаграммы характеризуют способность материала сопротивляться пластической деформации, а абсциссы – способность материала к пластической деформации. Такая диаграмма наиболее полно характеризует прочностные и пластические свойства материала детали потому, что истинные напряжения имеют больший физический смысл, чем условные, а относительное сужение не зависит от длины образца (в отличие от относительного удлинения) и может быть использовано как на участке равномерной деформации, так и при образовании сосредоточенной деформации вплоть до разрушения образца. Схематизированная диаграмма истинных напряжений при растяжении показана на рисунке.

Схематизированная диаграмма истинных напряжений при растяжении

Первый участок диаграммы имеет линейный характер и соответствует чисто упругой деформации образца. При этом тангенс угла наклона β этой прямой равен модулю нормальной упругости E_2 материала детали, который можно определить неразрушающим методом [11, 12]. В отличие от известных, этот метод предусматривает не упругое, а упругопластическое внедрение сферического индентора в поверхность испытуемого материала. При этом в формулу Г. Герца [13] введена специальная поправка, зависящая от параметров упругопластического контакта. В основу метода положен закон упругой разгрузки, согласно которому

при наличии остаточного отпечатка глубиной h обратимая упругая часть α_y полного сближения α в контакте также определяется формулой Г. Герца, но с учетом того обстоятельства, что сферический индентор контактирует уже не с плоской поверхностью детали, а со сферической поверхностью остаточного отпечатка. В результате получена зависимость для определения модуля нормальной упругости E_2 испытуемого материала

$$E_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{1,34(\alpha - h)\sqrt{R(\alpha + h)} - \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} F}, \quad (1)$$

где дополнительно α – полное сближение в контакте, h – глубина остаточного отпечатка, R – радиус сферического индентора, F – контактная нагрузка, E_1 – модуль нормальной упругости материала индентора, $\mu_{1,2}$ – коэффициент Пуассона (индексы 1 или 2 относятся к материалам индентора и испытуемого материала соответственно).

При дальнейшем увеличении нагрузки, растягивающей образец, в его материале возникает пластическая деформация. Отметим, что в начале испытаний площадь поперечного сечения растягиваемого образца практически не уменьшается до напряжений, равных пределу текучести; то есть в этот момент истинные напряжения S_T , отвечающие пределу текучести равны условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$. Величину этого напряжения можно определить неразрушающим методом по параметрам упругопластического внедрения сферического индентора по формуле [11, 14]

$$S_T = \sigma_{0,2} = \frac{0,955(1-2\mu_2)F}{d^2 (78u)^{245/НД}}, \quad (2)$$

где

$$u = \left(\frac{d}{2R} - 9,43K_1 \frac{F}{d^2} \right) (1-\mu_2), \quad (3)$$

$$K_1 = (1-\mu_1^2) / \pi E_1. \quad (4)$$

F – контактная нагрузка; d – диаметр остаточного отпечатка; НД – пластическая твердость [15]; R – радиус сферического индентора; E_2 и μ_2 – модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона испытуемого материала.

Ординате этой точки на диаграмме растяжения соответствует абсцисса, значение которой равно допуску на остаточную деформацию относительного удлинения $\varepsilon = 0,2$ %. При этом значение относительного сужения на основании закона постоянства объема и плотности материала при пластической деформации можно определить по формуле

$$\psi = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}. \quad (5)$$

Далее, по параметрам контактного внедрения определяют истинное временное сопротивление S_B . На стадии равномерного удлинения истинное временное сопротивление S_B и условное временное сопротивление (предел прочности) σ_B функционально связаны между собой $S_B = \sigma_B / (1-\psi)$. Значение σ_B можно определить согласно [11, 16]

$$\sigma_B = \frac{0,955(1-2\mu_2)F}{d^2 (0,0017u \cdot НД)^{245/НД}}. \quad (6)$$

Соответствующее этому напряжению предельное равномерное относительное сужение ψ_p (абсциссу диаграммы) определяют по формуле

$$\psi_p = 100 / (1 + 0,0041q), \quad (7)$$

где $q = F/A$ – среднее давление на поверхности остаточного отпечатка; F – нагрузка на сферический индентор; $A = \pi Dh$ – площадь боковой поверхности остаточного отпечатка; D – диаметр сферического индентора; h – глубина остаточного отпечатка.

Формула (7) в новой форме устанавливает взаимосвязи между основными параметрами, определяющими величину предельного равномерного сужения: пластические свойства материала при контактной деформации (от них зависит глубина остаточного отпечатка), прочностные свойства материала (от них зависит среднее давление на поверхности остаточного отпечатка).

Ординату третьей заключительной характерной точки диаграммы истинных напряжений растяжения – истинное сопротивление разрыву S_k определяют согласно [11, 17] по формуле

$$S_k = a \cdot q_n + b, \quad (8)$$

где

$$q_n = \frac{F}{2\pi R_n (h + 0,25\alpha_y)}, \quad (9)$$

h – остаточная, а α_y – упругая части полного сближения сферического индентора с поверхностью испытуемого материала; R_n – радиус кривизны поверхности отпечатка сферического индентора под нагрузкой; q_n – истинное давление под нагрузкой на поверхности отпечатка; a и b – коэффициенты, зависящие от химического состава испытуемого материала детали.

Формулы (8) и (9) в новой форме устанавливают взаимосвязи между всеми существенными параметрами, определяющими величину истинного сопротивления разрыву: пластические и упругие свойства испытуемого материала (от них зависят остаточная h и упругая α_y части полного сближения сферического индентора с поверхностью испытуемого материала и, следовательно, радиус кривизны поверхности отпечатка сферического индентора под нагрузкой), величина истинного давления q_n под нагрузкой на поверхности отпечатка,

а также коэффициенты a и b , значения которых зависят от химического состава испытуемого материала. Установлено, что для углеродистых и легированных конструкционных сталей $a = 0,257$, $b = 635$ МПа.

Абсциссу этой точки диаграммы растяжения, то есть относительное сужение после разрыва ψ_k определяют согласно [11, 18]

$$\psi_k = \frac{S_k}{M} = \frac{S_k}{z \cdot \text{НД}^\lambda}, \quad (10)$$

где дополнительно M – модуль пластичности испытуемого материала.

Зависимость (10) устанавливает взаимосвязи между всеми существенными параметрами, определяющими величину относительного сужения после разрыва: пластические свойства материала при контактной деформации (от них зависит контактный модуль упрочнения НД), прочностные свойства материала (от них зависит истинное сопротивление разрыву S_k), пластические свойства материала при растяжении (от них зависит относительное сужение после разрыва и, следовательно, модуль пластичности M), а также коэффициенты a и b , значения которых зависят от химического состава испытуемого материала. Авторами установлено, что для углеродистых и легированных конструкционных сталей $z = 0,12$, $\lambda = 0,65$.

Следует отметить, что полученные результаты справедливы для стандартных образцов [1]. Очевидно, что для конкретных деталей следует учитывать известными методами (например, приведенными в работе [19]) влияние концентраторов напряжений и масштабного фактора.

В качестве примера рассмотрим построение диаграммы истинных напряжений (при растяжении) по трем характерным точкам (кроме начала координат) путем однократного вдавливания сферического индентора в образец из стали 20 с пластической твердостью НД 1570 МПа. В качестве сферического индентора использовали стальной закаленный шарик с диаметром $D = 5$ мм. Величину нагрузки назначали согласно [15]: $F = 7358$ Н. Нагружение проводили с помощью прессы Бринелля. Упругое сближение α_y в контакте и глубину h остаточного отпечатка измеряли индикатором часового типа (с ценой деления 1 мкм), установленного в прибор для измерения контактных деформаций, конструкция которого аналогична, описанной в работе [20]. Диаметр остаточного отпечатка измеряли с помощью инструментального микроскопа МИМ-2 (с ценой деления 0,005 мм). Для сравнения строили диаграмму истинных напряжений путем стандартных [1] испытаний десятикратных образцов на растяжение с помощью программно-технического комплекса для испытания металлов ИР 5143-200. Для построения первого линейного участка диаграммы вычислили по параметрам упругопластического внедрения сферического индентора (формула 0) модуль нормальной упругости испытуемого материала $E_2 = 2 \cdot 10^5$ МПа. Значение E_2 , определенное путем растяжения образца – $E_2 = 2,02 \cdot 10^5$ МПа (разница ≈ 1 %). Результаты сравнения остальных механических свойств показаны в таблице.

Сопоставление результатов определения механических свойств стали 20 (НД 1570) путем вдавливания сферического индентора ($D = 5$ мм) и растяжением стандартных образцов [1]

Номер характерной точки	Механические свойства	По результатам внедрения сферического индентора	По результатам растяжения образца	Разница, %
1	S_{T_2} , МПа	313	320	2,19
	$\Psi_{0,2}$, %	$\approx 0,2$	$\approx 0,2$	0
2	S_B , МПа	528	490	-7,75
	Ψ_p , %	13,5	13,9	2,88
3	S_k , МПа	1000	1000	0
	Ψ_k , %	67,6	65	-4,00

Как видно из таблицы, погрешность определения механических свойств не превышает 8 %. Таким образом, создана возможность построения диаграммы истинных напряжений при растяжении по результатам однократного вдавливания сферического индентора. Необходи-

мо подчеркнуть, что поскольку значение пластической твердости не зависит от диаметра индентора и контактной нагрузки в широком диапазоне их изменения, то это не требует специального испытательного оборудования, кроме приборов для измерения твердости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 1497-84, ИСО 6892-84. Металлы. Методы испытания на растяжение. Введ. 16.07.1984.
2. *Марковец, М. П.* Определение механических свойств материалов по твердости / М. П. Марковец. – М. : машиностроение, 1979. – 191 с.
3. *Мильман, Ю. В.* Новые методики микромеханических испытаний материалов методом локального нагружения жестким индентором / Ю. В. Мильман // Современное материаловедение XXI столетия. – Киев : Наукова думка, 1998. – С. 637–656.
4. *Мильман, Ю. В.* Теория и методика определения предела текучести и пластичности материалов методом индентирования / Ю. В. Мильман, С. И. Чугунова, И. В. Гончарова // Актуальные проблемы прочности : сб. матер. Междунар. науч.-техн. конф. – Витебск. Беларусь, 2018. – С. 58–60.
5. РД ЭО 0027-2005. Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости. Введен 19.09.2006 – 53 с.
6. *Булычев, С. И.* Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / С. И. Булычев, В. П. АLEXIN. – М. : Машиностроение, 1990. – 224 с.
7. *Матюнин, В. М.* Индентирование в диагностике механических свойств материалов / В. М. Матюнин. – М. : Издательский дом МЭИ, 2015. – 288 с.
8. *Рудницкий, В. А.* Оценка пластичности металлических материалов методом динамического индентирования / В. А. Рудницкий, А. П. Крень, Г. А. Ланцман // Литье и металлообработка. – 2017. – № 2 (87). – С. 81–87.
9. ГОСТ Р 56474-2015 Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования. Введ. 01.01.2016.
10. *Матлин, М. М.* Математические модели для неразрушающего контроля индентированием физико-механических свойств металлоизделий / М. М. Матлин, Е. Н. Казанкина, В. А. Казанкин, А. И. Мозгунова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (229) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 42–46.
11. *Матлин, М. М.* Методы неразрушающего контроля прочностных свойств деталей машин / М. М. Матлин, А. И. Мозгунова, Е. Н. Казанкина, В. А. Казанкин. – М. : Инновационное машиностроение, 2019. – 247 с.
12. А.с. 1147951 СССР, МКИ⁴ G01N3/40. Способ определения физико-механических свойств материалов / М. С. Дрозд, М. М. Матлин. Оpubл. 30.03.95. Бюл. № 12.
13. *Hertz H.* Ueber die Berührung fester elastischen Körper, Gesammelte Werke, Bd.1. Leipzig, 1895, s. 155- 196.
14. Патент 2086947 Российская Федерация, МКИ⁶ G01N 3/00. Способ определения предела текучести материалов / Ю. И. Славский, М. М. Матлин. – Оpubл. 10.08.1997. Бюл. № 22.
15. ГОСТ 18835–73. Металлы. Метод измерения пластической твердости. – Введ. 01.01.74 (ограничение срока действия снято Межгосударственным Советом стандартизации, метрологии и сертификации, протокол №3-93, ИУС №5/6, 1993 г.).
16. Патент 2011182 Российская Федерация, МКИ⁵ G01 N3/40 Способ определения предела прочности материала / Ю. И. Славский, М. М. Матлин. – Оpubл. 10.08.1994. Бюл. №7.
17. Патент 2680111 Российская Федерация, МПК G01N3/42 Способ определения истинного сопротивления разрыву / М. М. Матлин, А. И. Мозгунова, Е. Н. Казанкина, В. А. Казанкин. Оpubл. 15.02.2019. Бюл. №5.
18. Положительное решение по заявке на патент № 2019109586 (от 06.12.2019). Способ определения относительного сужения после разрыва / М. М. Матлин, А. И. Мозгунова, Е. Н. Казанкина, В. А. Казанкин.
19. *Когаев, В. П.* Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность : справочник / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. – М. : Машиностроение, 1985. – 224 с.
20. *Демкин, Н. Б.* Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – М. : Машиностроение, 1981. – 244 с.