

АНАЛИЗ СПОСОБОВ РАСЧЕТА МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ИНДЕНТИРОВАНИИ

© 2024 г. К.В. Гоголинский^{1,*}, А.С. Уманский^{2,**}, А.С. Голев^{3,***},
К.И. Доронин^{2,****}, К.А. Томский^{4,*****}

¹НИИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Россия 188300 г. Гатчина, мкр. Орлова роща, 1

²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
Россия 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

³ООО «КОНСТАНТА», Россия 198097 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21

⁴ООО «НТП»ТКА», Россия 192289 Санкт-Петербург,
Грузовой проезд, 33, корп. 1, литер Б

E-mail: *nanoscan@yandex.ru; **refreshermd@gmail.com; ***artemgolev1999@gmail.com;
****doronin.k.i@mail.ru; *****tka46@mail.ru

Поступила в редакцию 02.06.2024; после доработки 20.06.2024

Принята к публикации 21.06.2024

Представлены результаты сравнительного анализа трех способов расчета модуля упругости при динамическом инструментальном индентировании: в соответствии с ГОСТ Р 56474, ГОСТ Р 8.748 и предложенным оригинальным оптическим способом, основанным на анализе геометрических параметров отпечатка, с использованием подготовленных образцов сплавов 20X25H20C2, 20X23H18 и БрАНЖНМц9-4-4-1.

Ключевые слова: метод динамического инструментального индентирования, динамическое индентирование, инструментальное индентирование, модуль упругости, твердость, механические свойства.

ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING THE MODULE OF ELASTICITY DURING DYNAMIC INSTRUMENTAL INDENTATION

© 2024 K.V. Gogolinskii^{1,*}, A.S. Umanskiy^{2,**}, A.S. Golev^{3,***}, K.I. Doronin^{2,****},
K.A. Tomskey^{4,*****}

¹NRC "Kurchatov Institute" — PINP, Russia 188300 Gatchina, m-rayon Orlova roshcha, 1

²Saint Petersburg Mining University, Russia 199106 St Petersburg, 21st Line, 2

³ООО«CONSTANTA», Russia 198097 St Petersburg, Ogorodnyj pereulok, 21

⁴ТКА Scientific Instruments LLC, Russia 192289 St Petersburg, Freight passage, 33

E-mail: *nanoscan@yandex.ru; **refreshermd@gmail.com; ***artemgolev1999@gmail.com;
****doronin.k.i@mail.ru; *****tka46@mail.ru

The results of a comparative analysis of three methods for calculating the elastic modulus during dynamic instrumental indentation are presented: in accordance with GOST R 56474, GOST R 8.748 and the proposed original method based on data from optical analysis of the indentation using prepared samples of alloys 20X25H20C2, 20X23H18 and BrANZhNMs9-4-4-1.

Keywords: dynamic instrumented indentation method, dynamic indentation, instrumented indentation, elastic modulus, hardness, mechanical properties.

DOI: 10.31857/S0130308224070098

ВВЕДЕНИЕ

Определение соответствия механических характеристик материала указанным в нормативной документации на продукцию, является неотъемлемой частью производственного процесса. При оценке свойств, характеризующих упругопластические деформации, используют различные параметры, в том числе твердость и модуль упругости материала. Их определение чаще связано с классическими испытаниями на твердость по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу, методу инструментального индентирования (ИИ) и т.д., а также разрушающими испытаниями, требующими подготовки специальных образцов. С развитием современных средств неразрушающего контроля активно развиваются методы испытаний материалов, основанные на динамическом индентировании. Метод динамического инструментального индентирования (ДИИ), основанный на определении свойств материалов по анализу процесса контактно-ударного взаимодействия падающего индентора с поверхностью испытуемого образца, потенциально позволяет определять модуль упругости материала, что, в свою очередь, позволит производить оценку свойств в целях диагностирования состояния изделий. Однако для этого необходима корректная

обработка сигналов измерительных преобразователей с учетом применяемых способов количественного расчета по диаграмме контактное усилие — глубина внедрения. Исследование проводилось в рамках работы по совершенствованию метода ДИИ и разработки прибора для безобразцового неразрушающего контроля механических свойств материалов и изделий [1, 2].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗЦЫ

Для получения численных значений модуля упругости E_{IT} при анализе диаграмм контактное усилие — глубина внедрения $P(h)$ рассматривается 3 способа расчета: в соответствии с ГОСТ Р 8.748 [3], в соответствии с ГОСТ Р 56474 [1, 4], а также с использованием предлагаемого оптического способа, основанного на анализе геометрических параметров отпечатка (рис. 2), получаемого в при динамическом индентировании. Основное различие данных способов — определение значения точки пересечения касательной h_r : метод ДИИ предполагает его определение с использованием рассчитываемой касательной к кривой разгрузки $P(h)$ в точке максимальной испытательной нагрузки F_{max} , а метод ДИ использует остаточную глубину отпечатка h_p и максимальную глубину внедрения h_{max} [1, 4].

На рис. 1 представлена диаграмма контактное усилие — глубина внедрения для способа ИИ.

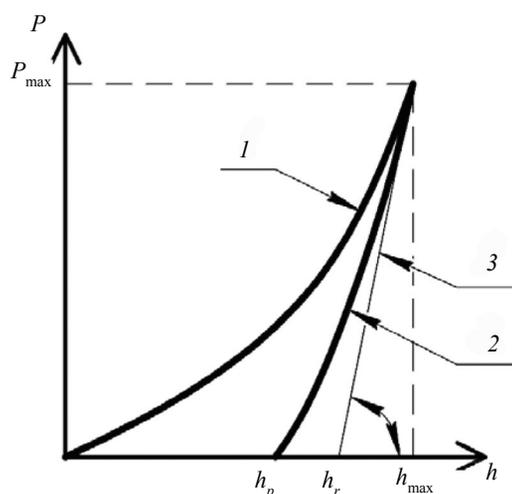


Рис. 1. Диаграмма контактное усилие — глубина внедрения для способа ИИ: 1 — кривая нагружения; 2 — кривая разгрузки; 3 — касательная к кривой 2 при F_{max} .

При оптическом расчете параметров ударно-контактного взаимодействия определение проекционной площади A_p и контактной глубины h_c производится на основании отпечатка с помощью оптического микроскопа (рис. 2б). Предполагается, что хорда AB на рис. 2а является диаметром отпечатка, полученного при воздействии сферического индентора радиуса R с исследуемой поверхностью.

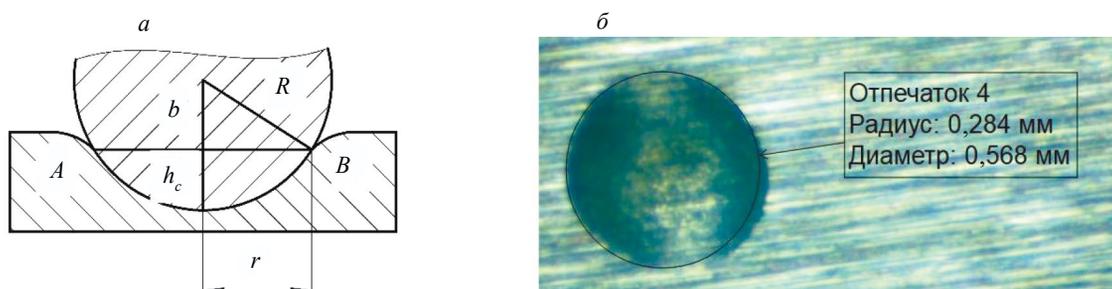


Рис. 2. Параметры отпечатка при индентировании: а — упрощенное изображение продольного сечения зоны отпечатка и индентора; б — фотография получаемого отпечатка.

Основные соотношения, используемые для расчета параметров отпечатка, параметров диаграмм контактное усилие — глубина внедрения и модуля упругости по трем способам представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные соотношения, используемые для расчета параметров отпечатка, параметров диаграмм контактное усилие — глубина внедрения и модуля упругости по трем способам

№	Параметр	ДИИ	ДИ	Оптический
1	Точка пересечения касательной h_p , мм	Исходя из проведения касательной	$h_r = h_{\max} - \frac{2 \cdot (h_{\max} - h_p)}{3}$	$h_r = h_{\max} - \frac{(h_{\max} - h_c)}{\varepsilon}$, $\varepsilon = 3/4$
2	Глубина прогиба контура отпечатка h_s , мм	—	$h_s = k \cdot h_e = \varepsilon \cdot (h_{\max} - h_p)$, $\varepsilon = 0,5$	—
3	Контактная глубина h_c , мм	$h_c = h_{\max} - \varepsilon \cdot (h_{\max} - h_r)$, $\varepsilon = 3/4$	$h_c = h_{\max} - h_s$	$h_c = R - b$; $b = \sqrt{R^2 - r^2}$; $R = 1,5$
4	Площадь проекции A_p , мм ²	$A_p = \pi \cdot r^2$; $r = \sqrt{R^2 - b^2}$; $b = R - h_c$	$A_p = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h_c$	$A_p = \pi \cdot r^2$
5	Контактная жесткость S , Н/мм		$S = \frac{dP}{dh}$; $dP = P_{\max}$; $dh = h_{\max} - h_r$	
6	Приведенный модуль упругости E_r , Н/мм ²		$E_r = \frac{S \cdot \sqrt{\pi}}{2 \cdot \sqrt{A_p}}$	
7	Модуль упругости E_{IT} , Н/мм ²		$E_{IT} = \frac{1 - (v_s)^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - (v_i)^2}{E_i}}$	

В табл. 1 представлены следующие переменные: ε — поправочный коэффициент для различных инденторов; h_e — упругая составляющая глубины вдавливания индентора, мм; v_s — коэффициент Пуассона материала испытываемого образца; v_i — коэффициент Пуассона материала индентора; E_i — модуль упругости материала индентора, Н/мм².

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительные исследования проводились с использованием трех материалов: сталей 20X25H20C2 и 20X23H18 твердостью 319 HV0,2 и 189 HV0,2, соответственно, а также сплава безоловянной бронзы БрАНЖНМц9-4-4-1 твердостью 134 HV0,2, соответствующими по своим геометрическим параметрам и массе требованиям [5]. При этом, сигнал модифицированного преобразователя Либя для реализации метода ДИИ [2], записанный с частотой 15 МГц с помощью осциллографа Keysight Technologies DSOX2002A, обрабатывался с использованием программы в пакете MATLAB для построения зависимостей $P(h)$ для трех образцов (рис. 3).

Рассчитанные для образцов значения модуля упругости представлены в табл. 2.

Было установлено, что результаты расчета модуля упругости оптическим способом существенно зависят от погрешности измерения радиуса отпечатка на испытываемом образце. При анализе отпечатков выявлено, что увеличение относительной погрешности измерения радиуса

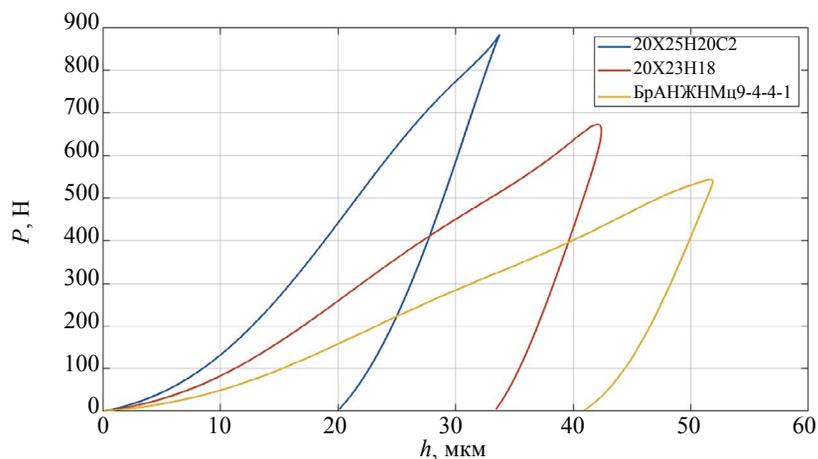


Рис. 3. Рассчитанные диаграммы контактное усилие — глубина внедрения для образцов сплавов 20X25H20C2, 20X23H18 и БрАНЖНМц9-4-4-1.

Таблица 2

Значения модуля упругости E_{IT} для образцов сплавов 20X25H20C2, 20X23H18 и БрАНЖНМц9-4-4-1, ГПа

Материал	ИИ	ДИИ	Оптический	Справочное
20X25H20C2	154	181	148	206
20X23H18	132	176	234	206
БрАНЖНМц9-4-4-1	78	91	62	106

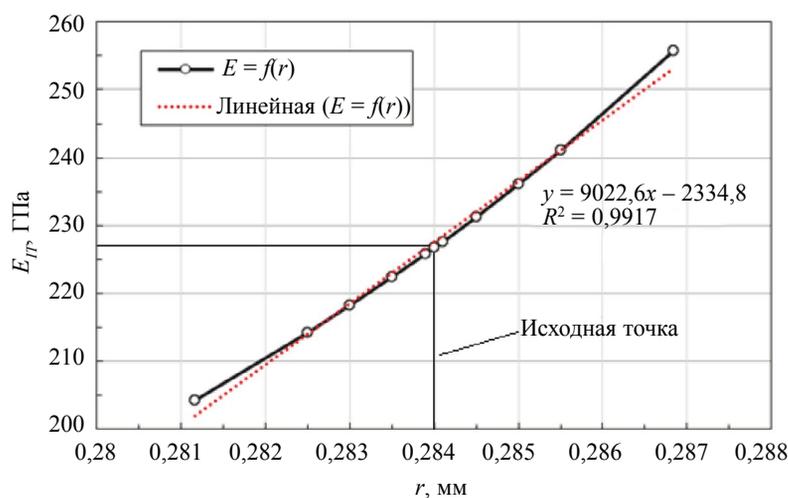


Рис. 4. Зависимость рассчитанного модуля от измеренного радиуса.

на 1 % вызывает ошибку расчета модуля упругости на 12 %. Зависимость результатов расчета модуля упругости при индентировании от погрешности измерения радиуса отпечатка представлена на рис. 4.

ВЫВОДЫ

Применение способа ДИИ по ГОСТ Р 56474 обеспечивает наиболее близкий результат измерения модуля упругости к справочным значениям (с отклонением 13—15 %). Применение способов ИИ по ГОСТ Р 8.748 и предложенного оптического демонстрируют погрешности измерения порядка 25—36 % и 14—28 % соответственно.

Характер зависимости области перехода от нагружения к разгрузению для диаграмм контактное усилие — глубина внедрения (см. рис. 3) зависит от материала и соотношения значений модуля упругости к твердости, что может приводить к дополнительной погрешности при использовании описанных способов измерения модуля упругости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крень А.П., Протасеня Т.А. Определение физико-механических характеристик изотропного пирографита по параметрам динамического индентирования // Дефектоскопия. 2014. № 7. С. 51—59.
2. Umanskii A.S., Gogolinskii K.V., Syasko V.A., Golev A.S. Modification of the Leeb Impact Device for Measuring Hardness by the Dynamic Instrumented Indentation Method // Inventions. 2022. 7. DOI: 10.3390/inventions7010029
3. ГОСТ Р 8.748—2011 (ИСО 14577-1:2002) Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик металлов при инструментальном индентировании.
4. ГОСТ Р 56474—2015. Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования.
5. ГОСТ Р 8.969—2019 Металлы и сплавы. Определение твердости по шкалам Либа — Часть 1. Метод измерений.

REFERENCES

1. Kren A.P., Protasenya T.A. Determination of the physic and mechanical characteristics of isotropic pyrolytic graphite by dynamic indentation method // Defectoskopya. 2014. No. 7. С. 51—59.
2. Umanskii A.S., Gogolinskii K.V., Syasko V.A., Golev A.S. Modification of the Leeb Impact Device for Measuring Hardness by the Dynamic Instrumented Indentation Method // Inventions. 2022. V. 7. DOI: 10.3390/inventions7010029
3. GOST R 8.748—2011 (ISO 14577-1:2002) Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Test method.
4. GOST R 56474—2015. Space systems. Non-destructive testing of physics and mechanical properties of space technique's materials and coatings by dynamic indentation. General requirements.
5. GOST R 8.969—2019 State system for ensuring the uniformity of measurements. Metals and alloys. Leeb hardness test. Part 1: Test method.