

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

© 2023 г. К.В. Гоголинский<sup>1,\*</sup>, А.С. Уманский<sup>1,\*\*</sup>, А.С. Голев<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Россия 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия Васильевского острова, 2

E-mail: \*gogolinskiy\_kv@pers.spmi.ru; \*\*umanskiy\_as@pers.spmi.ru;

\*\*\*artemgolev1999@gmail.com

Поступила в редакцию 31.05.2023; после доработки 14.06.2023

Принята к публикации 16.06.2023

Исследования проведены в рамках разработки неразрушающего метода измерения механических свойств металлов и сплавов на основе метода динамического инструментального индентирования. Целью данной работы является изучение возможности измерения модуля упругости с помощью модифицированного твердомера Либа. Эксперимент проводился на образцах сплавов 20Х25Н20С2, 20Х23Н18 и БрАНЖНМц9-4-1.

**Ключевые слова:** механические испытания, модуль упругости, твердость, метод Либа, метод динамического инструментального индентирования.

**DOI:** 10.31857/S0130308223080080, **EDN:** DZHG0X

### ВВЕДЕНИЕ

Существующие тенденции современного производства в вопросах повышения надежности, долговечности и качества выпускаемой продукции ставят новые задачи в области контроля продукции. В промышленности предъявляются высокие требования к используемым металлам и сплавам, о качестве которых судят по их физико-механическим характеристикам. Одним из важнейших физико-механических параметров металлов и сплавов является их модуль упругости. К современным методам определения модуля упругости относятся испытания на растяжение [1], испытания методом инструментального индентирования [2] и испытания методом динамического инструментального индентирования (ДИИ) [3]. Определение модуля упругости при помощи испытаний на растяжение или по методу инструментального индентирования требует вырезки из объекта испытания испытуемого образца для проведения эксперимента в лабораторных условиях. Метод ДИИ позволяет проводить оперативные неразрушающие испытания с целью определения физико-механических параметров материала непосредственно на объекте контроля, что является актуальной задачей современной промышленности.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗЦЫ

На сегодняшний день нет серийного исполнения приборов и систем, реализующих метод ДИИ, а ГОСТ Р 56474—2015 «Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования» не регламентирует требования к энергетическим параметрам ударника преобразователя, поэтому в работе [4] было предложено использование модифицированных преобразователей по методу Либа [5] для реализации метода ДИИ. Результаты, полученные в работе [4], показали, что при использовании модернизированного преобразователя Либа возможно получить классические зависимости контактной нагрузки  $P$  от перемещения индентора ударника  $h$  и рассчитать рассеянную энергию удара, упругую энергию удара и контактное давление.

В данной работе исследовалась возможность определения модуля упругости методом ДИИ при помощи модифицированного преобразователя Либа. Для проведения эксперимента были подготовлены образцы сплавов стали 20Х25Н20С2 и 20Х23Н18 и бронзы БрФНЖНМц9-4-1. В целях обеспечения соответствия испытуемых образцов требованиям для испытаний твердомером Либа по ГОСТ Р 8.969—2019 (ИСО 16859-1:2015) «Металлы и сплавы. Определение твердости по шкалам Либа. Часть 1. Метод измерений» были выполнены операции точения, шлифовки и притирки их к более массивным основаниям.

При проведении испытаний сигнал с измерительной катушки индуктивности записывался при помощи осциллографа, сохранялся на флеш-накопитель и обрабатывался на персональном компьютере в программной среде MatLab.

Методика построения зависимостей контактной нагрузки от перемещения ударника  $P(h)$  описана в [4]. Полученный массив данных сигнала переменной ЭДС  $e(t)$  пересчитывался в значение скорости  $v(t)$  при помощи коэффициента пропорциональности  $k$ . Зависимость ускорения ударника  $a(t)$  от времени определяется путем численного дифференцирования  $v(t)$  по времени. Контактная нагрузка ударного взаимодействия  $P(t)$  была получена путем умножения ускорения на известное значение массы ударника  $m = 5,44$  г. Интеграл  $v(t)$  дает перемещение ударника  $h(t)$ . Из зависимостей  $P(h)$  по ГОСТ Р 8.748—2011 (ИСО 14577-1:2002) «Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний» были получены следующие данные: приведенный модуль упругости  $E_r$  и модуль упругости при индентировании  $E_{IT}$ . Максимальная испытательная нагрузка  $F_{\max}$ , максимальная глубина индентирования  $h_{\max}$ , остаточная глубина отпечатка после снятия испытательной нагрузки  $h_p$ , глубина  $h_r$ , определяемая точкой пересечения касательной к кривой разгрузки при  $F_{\max}$  с осью перемещения  $h$ . По этим были данным рассчитаны глубина погружения наконечника в испытательный образец при  $F_{\max}$   $h_c$ , площадь поперечного сечения наконечника на расстоянии  $h_c$  от вершины  $A_p(h_c)$ , податливость в месте контакта  $C$ , приведенный модуль упругости  $E_r$  и модуль упругости при индентировании  $E_{IT}$ . При расчете  $h_c$  брался коэффициент  $\varepsilon$ , равный 0,75, так как ударник имеет сферический индентор с радиусом 1,5 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На описанных выше образцах было проведено по 10 испытаний, рассчитаны среднее значение и СКО. Результаты эксперимента, справочные значения модуля Юнга исследуемых сплавов и их сравнение представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний

| Номер испытания                           | Модуль упругости при индентировании $E_{IT}$ , ГПа |          |                 |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------|-----------------|
|                                           | 20X25H20C2                                         | 20X23H18 | БрАНЖНМц9-4-4-1 |
| Параметр                                  | Значение                                           |          |                 |
| Среднее значение, ГПа                     | 153                                                | 136      | 84              |
| СКО, ГПа                                  | 7                                                  | 6        | 6               |
| Справочное значение модуля упругости, ГПа | 204                                                | 204      | 106             |
| Абсолютная погрешность, ГПа               | 51                                                 | 68       | 22              |
| Относительная погрешность, %              | 25                                                 | 33       | 21              |

## ВЫВОДЫ

Значения рассчитанного модуля упругости при индентировании  $E_{IT}$  ниже на 25 % для образца стали 20X25H20C2, на 33 % для образца стали 20X23H18 и на 21 % для образца бронзы БрАНЖНМц9-4-4-1. Полученные результаты демонстрируют корреляцию измеряемых значений со справочными данными, однако наблюдается существенное систематическое отклонение. Причиной этого могут быть как погрешности при измерении первичных параметров  $P(t)$  и  $h(t)$ , так и применение методики анализа зависимостей  $P(h)$ , принятой для статического инструментального индентирования. Решить эти проблемы можно за счет повышения точности измерения первичных параметров путем анализа фактических размеров получаемых отпечатков, а также разработки методики анализа зависимостей  $P(h)$  с учетом динамического характера взаимодействия. Результатом исследований можно считать подтверждение перспективности применения метода ДИИ для неразрушающего контроля механических свойств материалов, однако для повышения точности метода требуются дополнительные исследования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rodrigues Santiago, Miri Seyed, Cole Richard G., Postigo Abraham Avalos, Saleh Menna A., Dondish Alexander, Melenka Garrett W., Fayazbakhsh Kazem.* Towards optimization of polymer filament tensile test for material extrusion additive manufacturing process // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. ISSN 2238-7854. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.088>
  2. *Han Giyeol, Marimuthu Karuppasamy Pandian, Lee Hyungyil.* Evaluation of thin film material properties using a deep nanoindentation and ANN // *Materials & Design*. 2022. V. 221. P. 111000. ISSN 0264-1275. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111000>
  3. *Rudnitskii V.A., Rabtsevich A.V.* Method of dynamic indentation for evaluating the mechanical characteristics of metallic materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 1997. V. 33. No. 4. P. 266—271.
  4. *Umanskii A., Gogolinskii K., Syasko V., Golev A.* Modification of the Leeb Impact Device for Measuring Hardness by the Dynamic Instrumented Indentation Method // *Inventions*. 2022. V. 7. P. 29. <https://doi.org/10.3390/inventions7010029>
  5. *Leeb D.* New dynamic method for hardness testing of metallic materials // *VDI-Report*. 1978. No. 308. P. 123—128.
-