

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

## **ПЕРЕНОСНИЙ ПРИЛАД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ МЕТАЛІВ МЕТОДОМ ІНСТРУМЕНТОВАНОГО ІНДЕНТУВАННЯ**

*Описано переносний прилад РІПТ-02 для визначення характеристик міцності металів методом інструментованого індентування. Прилад розроблено згідно з вимогами ISO 14577 для проведення випробувань на макрорівні. Працездатність прилада продемонстрована випробуваннями на зразках із сталей 20, 45, 15Х2НМФА і трубі  $\varnothing 160 \times 15$  мм із сталі 22К.*

**Ключові слова:** метод інструментованого індентування, діаграма індентування, переносний прилад, границя міцності, методика.

**Вступ.** Забезпечення надійної експлуатації, можливість продовжити ресурс відповідального обладнання в значній мірі залежить від коректності і точності отримуваних величин механічних характеристик матеріалів, визначення їх зміни в процесі експлуатації. На теперішній час існує потреба в отриманні нових даних про деформування і руйнування матеріалів корпусів реакторів і іншого відповідального обладнання АЕС з урахуванням реальних умов їх експлуатації, визначення їх пошкоджуваності в процесі експлуатації.

З метою одержання більш повної і точної інформації про поведінку матеріалу під навантаженням в останні роки в світі інтенсивно розвивають інструментовані методи випробувань матеріалів і конструктивних елементів, які ґрунтуються на цифровій реєстрації параметрів всього процесу деформування матеріалу. Одним з них є метод інструментованого індентування [1–4]. Для реєстрації процесу неперервного деформування матеріалу індентором у вигляді діаграми інструментованого індентування в координатах зусилля – глибина вдавлювання в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України розроблена лабораторна установка UTM-20НТ [5] (рис. 1) у відповідності з вимогами міжнародного стандарту ISO 14577 [6]. Ця установка призначена для випробування зразків і невеликих деталей в лабораторних умовах з метою апробації методик визначення характеристик міцності методом інструментованого індентування.

Для проведення досліджень методом інструментованого індентування з метою визначення характеристик міцності в умовах виробництва на базі лабораторної установки UTM-20НТ створений прилад РІПТ-02 (рис. 2).

**Опис приладу.** Переносний прилад РІПТ-02, як і установка UTM-20НТ розроблений у відповідності з вимогами [6] і призначений для проведення випробувань в макродіапазоні. Прилад складається з пристрою навантаження 1, основи 2, блоку вимірювання і управління 3 та персонального комп'ютера 4. Пристрій навантаження приладу забезпечує створення вдавлюючих зусиль

і містить послідовно з'єднані між собою двигун, планетарний редуктор, шарико-гвинтовий привід з порожнистим валом, на якому встановлено вузол індентування.



Рис. 1. Установка UTM-20HT для визначення механічних характеристик конструкційних матеріалів методом інструментованого індентування: 1 – колони; 2, 3 – нерухомі траверси; 4 – пристрій навантаження індентора; 5 – навантажувальний шток; 6 – координатний столик; 7 – блок управління установки; 8 – датчик сили; 9 – датчики переміщення; 10 – вимірювальна система Spider-8; 11 – датчик лінійних переміщень RC13-150M; 12 – система управління і обробки даних.

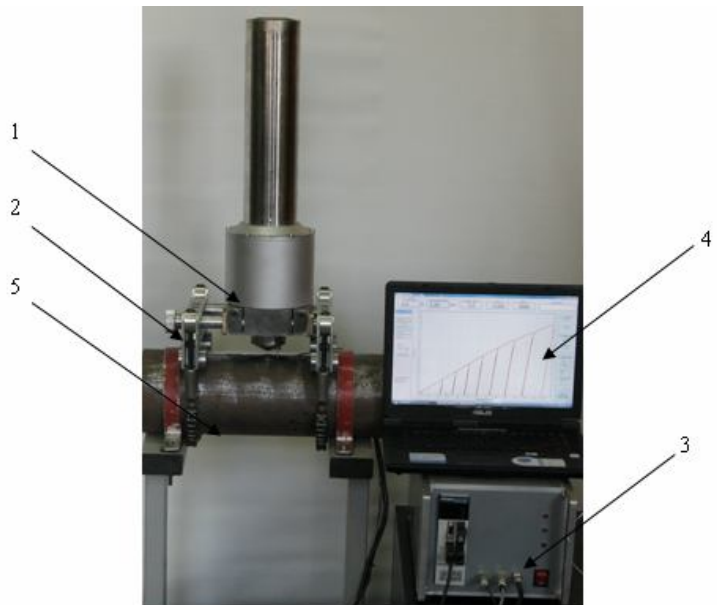


Рис. 2. Прилад РІТ-02 для проведення випробувань методом інструментованого індентування у виробничих умовах: 1 – пристрій навантаження; 2 – основа; 3 – блок вимірювання і управління; 4 – персональний комп'ютер; 5 – об'єкт випробування (труба).

Вузол індентування переносного приладу конструктивно ідентичний вузлу індентування лабораторної установки. Для зменшення навантаження на індентор замість кульки діаметром 2,5 мм в приладі використовується кулька діаметром 1 мм. Це дозволило зменшити габаритні розміри і вагу приладу. Для вимірювання зусилля, що діє на індентор, в приладі використовується датчик U3 фірми HBM (Німеччина) з номінальним зусиллям 2 кН. Вибір датчика обумовлений високим рівнем стійкості за рахунок вбудованого компенсатора бокових зусиль і невеликих габаритних розмірів. Замість двох датчиків вимірювання глибини вдавлювання в мобільній установці використовується один – WI/2mm-T з номінальним діапазоном вимірювання  $\pm 1$  мм.

Основа призначена для точної установки пристрою навантаження на трубах діаметром від 150 до 1500 мм (або плиті) і переміщення його вздовж труби на відстань до 50 мм.

**Програмне забезпечення установки.** Для проведення вимірювань зусиль індентування і глибини вдавлювання, управління навантажувальним пристроєм, реєстрації діаграм індентування і збереження експериментальних даних використано удосконалену версію програми HardTest-3M [5]. При цьому враховувалися такі важливі вимоги як зручність роботи з приладом, висока точність вимірювань, забезпечення безпечної роботи вимірювальних датчиків і індентора, висока функціональність установки, а також інші вимоги до виконання процесу індентування, що представлені у відповідних нормативних документах [6].

Для забезпечення високої точності і широкого діапазону вимірювання зусилля і глибини вдавлювання індентора вихідні оцифровані дані піддаються програмному інтегруванню за період часу, що рівний періоду мережі живлення. Крім цього при розробці установки прийняті всі можливі заходи щодо зниження рівня електричних і електромагнітних перешкод. В результаті випадкова похибка або розкид вимірюваних значень зусилля склав  $\pm 0,1$  Н, а глибини вдавлювання –  $\pm 0,01$  мкм.

Оскільки індентор і датчик переміщення, при установці навантажувального пристрою на об'єкт, закриті захисним кожухом і недоступні візуальному контролю, в програмі HardTest-3M з метою їх безпечної роботи прийняті запобіжні заходи. Весь діапазон переміщення вузла індентування від його початкового безпечного положення (3 мм від поверхні об'єкта) і до точки дотику розділено на три ділянки, на яких швидкість переміщення навантажувального штока послідовно знижується, що дозволяє здійснити м'який контакт індентора зі зразком. Визначення глибини вдавлювання індентора, що більша 1 мм (межа вимірювання датчика переміщення) здійснюються програмно, для цього інтерфейс програми має віртуальний цифровий індикатор переміщення навантажувального штока. Крім того, реальний стан вузла індентування візуалізується програмою за допомогою спеціальних індикаторів.

Для зручності роботи з установкою графічний інтерфейс програми містить віртуальні цифрові індикатори зусилля, глибини вдавлювання індентора, швидкості навантажувального штока, час випробувань, а також інформаційне табло, які завжди активні і які видно оператору. У програмі закладені широкі можливості для встановлення закону індентування.

Можливе виконання одного або декількох циклів навантаження без або з витримкою індентора під навантаженням при регулюванні за зусиллям або глибиною вдавлювання індентора, при цьому задаються часові інтервали. Передбачена можливість формування закону індентування довільної форми, при якому значення зусилля і часу вводяться в табличній формі.

**Тестові випробування.** Для перевірки роботоздатності переносного приладу проводили комплексні випробування в лабораторних і виробничих умовах. В лабораторних умовах випробували сталі марок 20, 45 і 15Х2НМФА з метою статистичної обробки результатів випробувань і отримання кореляційної залежності для визначення межі міцності  $\sigma_B$  за кутом нахилу  $a$  діаграми інструментованого індентування в координатах  $F - h_{\text{plast}}$  ( $F$  – зусилля навантаження,  $h_{\text{plast}}$  – пластична складова глибини вдавлювання індентора в циклічному режимі навантаження) згідно з методикою [7]:

$$\sigma_B = 0,0747 a + 108,59. \quad (1)$$

Важливо, що застосування такої методики не потребує додаткових розрахунків, які пов'язані з впливом пружної деформації вузла вимірювання глибини вдавлювання індентора.

Для прикладу на рис. 3 показано діаграму інструментованого індентування в координатах  $F - h$  ( $h$  – глибина вдавлювання індентора), яка записана приладом РІТ-02 в циклічному режимі навантаження. Перебудовані діаграми індентування в координатах  $F - h_{\text{plast}}$  показано на рис. 4. Результати визначення кута нахилу діаграм індентування  $F - h_{\text{plast}}$  наведені в таблиці і є середньоарифметичними п'яти вимірювань. В таблиці також представлені результати визначення величин межі міцності за кореляційною залежністю (1) і їх відхилення від величин межі міцності, що визначені методом одновісного розтягу.

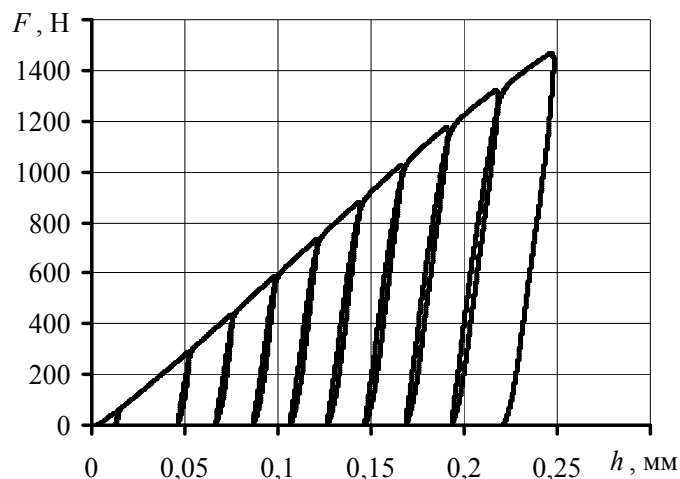


Рис. 3. Приклад діаграми навантаження – глибина вдавлювання індентора при індентуванні приладом РІТ-02 зразка із сталі 45.

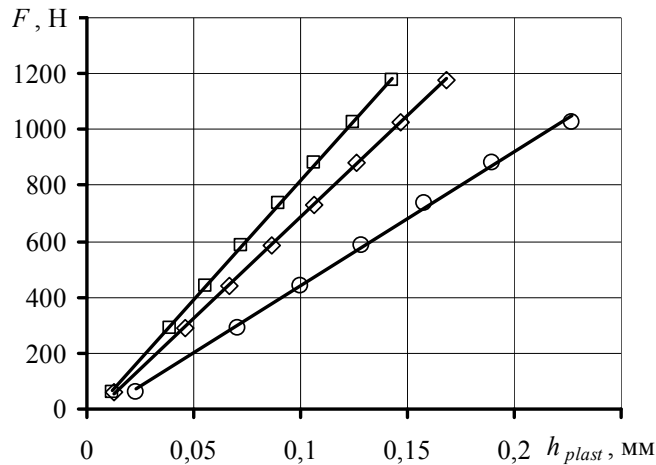


Рис. 4. Діаграми інструментованого інденування в координатах  $F - h_{plast}$  для ряду конструкційних сталей:  $\circ$  – 20;  $\diamond$  – 45 і  $\square$  – 15X2NMFA.

**Результати визначення межі міцності методами одновісного розтягу і інструментованого інденування.**

Сталь марки	Інструментоване інденування		Розтяг	Відхилення результатів $\sigma_B^{ind}$ від $\sigma_B$ , %
	$a$ , Н/мм	$\sigma_B^{ind}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	
20	4823,9	468,9	459,1	2,1
45	7236,6	649,2	677,6	4,2
15X2NMFA	8540,9	746,6	728,4	2,5

При цьому випробування на розтяг циліндричних зразків з діаметром робочої частини 5 мм проводили на установці INSTRON 8802. Деформацію реєстрували встановленим на робочу частину зразка екстензометром з базою  $l_0 = 12,5$  мм.

Відхилення результатів визначення межі міцності методом інструментованого інденування  $\sigma_B^{ind}$  від результатів випробувань на одновісний розтяг  $\sigma_B$  не перевищує 5%. Таким чином, розроблену установку і запропоновану методику для визначення межі міцності методом інструментованого інденування [7] можна рекомендувати для практичного використання.

У промислових умовах методом інструментованого інденування була визначена межа міцності труби діаметром 160 мм і товщиною стінки 15 мм зі сталі 22К. Для порівняння була визначена межа міцності на розтяг матеріалу вищевказаної труби за ГОСТ 10006-80 [8]. Величина межі міцності, які отримано методом інструментованого інденування, склала 524,5 МПа і є

середньоарифметичним п'яти вимірів, а межа міцності, яку отримано шляхом випробувань на розтяг, – 502,3 МПа. Відхилення між ними склало 4%.

Таким чином, створений прилад РІТ-02 дозволяє з високою точністю реєструвати процес вдавлювання індентора як в зразки, так і елементи конструкцій для визначення характеристик міцності матеріалів методом інструментованого інденування і може ефективно використовуватися в лабораторних і у виробничих умовах.

### Summary

The paper describes a РІТ-0.2 portable device for determining the strength characteristics of metals by the instrumented indentation test method. The device was developed in accordance with the requirements of ISO 14577 and is intended for macro testing. The serviceability of the device is demonstrated by testing specimens of steels 20, 45 and 15Kh2NMFA and a pipe made of steel 22K with diameter 160×15 mm.

**Keywords:** instrumented indentation test method, indentation curve, portable device, ultimate strength, methods.

### Резюме

Описан прибор РІТ-02 для определения прочностных характеристик металлов методом инструментированного индентирования. Прибор разработан в соответствии с требованиями ISO 14577 для проведения испытаний на макроуровне. Продемонстрирована работоспособность прибора на образцах из сталей 20, 45, 15X2НМФА и трубе  $\varnothing$  160×15 мм из стали 22К.

**Ключевые слова:** метод инструментированного индентирования, диаграмма индентирования, переносной прибор, предел прочности, методика.

1. *Марковец М. П.* Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
2. *Матюнин В. М.* Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 216 с.
3. *Бакиров М. Б., Потанов В. В.* Феноменологическая методика определения механических свойств корпусных сталей ВВЭР по диаграмме вдавливания шарового индентора // Завод. лаб. – 2000. Том 66, № 12. – С. 35 – 44.
4. *Haggag, F. M.* Innovative SSM Technology Determines Structural Integrity of Metallic Structures: Example Applications for Pressure Vessels and Oil and Gas Pipelines. // International Journal of Pure and Applied Physics – 2007. № 1. – P 91 – 108.
5. *Харченко В. В., Рудницкий Н. П., Каток О. А., Неговский А. Н., Дроздов А. В., Кутняк В. В.* Установка для определения механических характеристик конструкционных материалов методом инструментированного

- индентирования // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2007. – Вып. 27. – С. 140 – 147.
6. *ISO 14577-1:2002. Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Test method.*
  7. *Каток О. А., Харченко В. В., Дроздов А. В., Панасенко О. В.* Определение механических свойств сталей методом непрерывного индентирования. // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2009. – Вып. 31. – С. 208 – 213.
  8. *ГОСТ 10006-80.* Трубы металлические. Метод испытания на растяжение. Дата введения – 01.07.80.

Поступила 30.11.2009