

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Сумський державний університет**  
Центр заочної, дистанційної та вечірньої форм навчання

(повна назва інституту/факультету)

**Кафедра технології машинобудування, верстатів та інструментів**  
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ **Віталій ІВАНОВ**  
(підпис) (Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

\_\_\_\_\_ **грудня** \_\_\_\_\_ **2023 р.**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня **«магістр»**  
(бакалавр/магістр)

зі спеціальності **152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»**  
(код та назва)

**освітньо-професійної** програми **«Якість, стандартизація та сертифікація»**  
(освітньо-професійної/освітньо-наукової) (назва програми)

на тему: **Нормативне забезпечення метрологічної атестації**  
**мір твердості контрольних**

Здобувача (ки) групи **СТ.мз-21с** **Мамочка Сергій Олександрович**  
(шифр групи) (прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ **Сергій МАМОЧКА**  
(підпис) (Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник **доц., канд. техн. наук, доц. Олександр ІВЧЕНКО** \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Нормоконтролер **доц., канд. техн. наук, доц. Олександр ІВЧЕНКО** \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Сумський державний університет**

Центр заочної, дистанційної та вечірньої форм навчання

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра технології машинобудування, верстатів та інструментів

(повна назва кафедри)

Завідувачу кафедри

**Віталію ІВАНОВУ**

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

здобувача (ки) групи **СТ.мз-21с**

(шифр групи)

**Сергій МАМОЧКА**

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

**ЗАЯВА**

Прошу затвердити мені тему кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня «магістр» зі спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

(бакалавр/магістр)

(код та назва)

освітньо-професійної програми «Якість, стандартизація та сертифікація»:

(освітньо-професійної/освітньо-наукової)

(назва програми)

**Нормативне забезпечення метрологічної атестації**

(назва теми)

**мір твердості контрольних**

(дата та підпис здобувача)

**ПОГОДЖЕНО:**

Керівник кваліфікаційної роботи:

**Олександр ІВЧЕНКО**

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ УКРАЇНИ**  
**«Сумський державний університет»**

Інститут, факультет	<u>Центр заочної, дистанційної та вечірньої форм навчання</u>
Кафедра	<u>Технологія машинобудування, верстати та інструменти</u>
Освітньо-науковий рівень	<u>другий (магістерський)</u> (шифр і назва)
Спеціальність	<u>152 – метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка</u> (шифр і назва)
Освітня програма	<u>152.1 Якість, стандартизація та сертифікація</u> (шифр і назва освітньої програми, за наявності)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри технології  
машинобудування, верстатів та  
інструментів

\_\_\_\_\_ Віталій ІВАНОВ

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 року

**ЗАВДАННЯ**  
**ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ (ПРОЄКТУ) ЗДОБУВАЧ**

**Мамочка Сергій Олександрович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) «Нормативне забезпечення метрологічної атестації  
мір твердості контрольних»

керівник проекту Івченко Олександр Володимирович канд. техн. наук, доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 30.11.2023 за № 1381-VI

2. Строк подання студентом роботи (проєкту) «22» грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи (проєкту) Вимоги міжнародних, регіональних та  
національних стандартів, законодавчих документів щодо підтвердження  
метрологічних характеристик мір твердості контрольних

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно  
розробити) 1. Актуальність проблеми, визначення мети та завдань досліджень.

1. Аналіз властивостей матеріалів та питання вимірювання їх твердості в інженерній  
справі. 2. Дослідження сучасного стану розвитку методів вимірювання твердості.

3. Дослідження сучасного стану розвитку методів вимірювання твердості.

4. Розроблення програми та методики підтвердження метрологічних характеристик  
контрольних мір твердості.

## 5. Консультанти розділів роботи (проєкту)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

## 6. Дата видачі завдання «10» вересня 2023 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи (проєкту)	Строк виконання етапів роботи (проєкту)	Примітка
1	Актуальність проблеми, визначення мети та завдань досліджень	01.10.2023	
2	Аналіз властивостей матеріалів та питання вимірювання їх твердості в інженерній справі	01.10.2023	
3	Дослідження сучасного стану розвитку методів вимірювання твердості	01.11.2023	
4	Дослідження сучасного стану розвитку методів вимірювання твердості	01.11.2023	
5	Розроблення програми та методики підтвердження метрологічних характеристик контрольних мір твердості	01.12.2023	
6	Формулювання загальних висновків	10.12.2023	
7	Підготовка доповіді	14.12.2023	
8	Підготовка презентації	14.12.2023	
9	Оформлення роботи	20.12.2023	

Здобувач

\_\_\_\_\_

(підпис)

Сергій МАМОЧКА

\_\_\_\_\_

(ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи (проєкту)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Олександр ІВЧЕНКО

\_\_\_\_\_

(ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ОЗНАК АКАДЕМІЧНОГО ПЛАГІАТУ**

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з повним звітом подібності, який був згенерований системою **StrikePlagiarism.com**.

**Автор:** Мамочка Сергій

**Назва роботи:** 2023\_Mamochka\_Metrolog.pdf

**Науковий керівник:** . Анна Олександрівна Нешта

**Підрозділ:** \_\_\_\_\_

*(інститут (факультет), кафедра, навчальна група (для осіб, що навчаються))*

**Вид роботи:** \_\_\_\_\_

*(кваліфікаційна робота, дисертація, підручник, посібник, монографія, стаття, тези, звіт НДР тощо)*

**Коефіцієнт подібності 1:** 6.3%

**Коефіцієнт подібності 2:** 3.3%

Після проведеного мною аналізу Звіту подібності, констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі, оформлені коректно і не мають ознак академічного плагіату.

Виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки академічного плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

**Опис прийнятого рішення**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

*(Власне ім'я ПРІЗВИЩЕ  
відповідальної за перевірку особи, визначеної додатком до  
Положення про академічну доброчесність та  
етику академічних взаємовідносин у СумДУ)*

\_\_\_\_\_. 202\_ р.

\_\_\_\_\_  
*(підпис)*

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра становить 77 аркушів, в тому числі 7 рисунків, 2 таблиць, бібліографії із 53 джерела на чотирьох аркушах, один додаток на 12 аркушах.

Сучасні методи випробування твердості були розроблені і введені в експлуатацію в ХХ столітті, при цьому методи вимірювань залишаються незмінними, модернізується лише випробувальне обладнання. Завдяки появі і розвитку нових обчислювальних технологій і устаткуванню на ринку стали поширюватися нові портативні методи випробування твердості, що дозволяють оперативно здійснювати безвибірковий контроль характеристик виробів складної форми, а також проводити вимірювання у важкодоступних місцях.

Мета та завдання роботи. Метою роботи є забезпечення точності та достовірності результатів контролю механічних властивостей засобів вимірювальної техніки на основі розроблення програми та методики підтвердження метрологічних характеристик на міри твердості контрольні.

Для досягнення поставленої мети в роботі були встановлені та вирішені наступні завдання:

1. Аналіз властивостей матеріалів та питання вимірювання їх твердості в інженерній справі.
2. Дослідження сучасного стану розвитку методів вимірювання твердості.
3. Дослідження сучасного стану розвитку методів вимірювання твердості.
4. Розроблення програми та методики підтвердження метрологічних характеристик контрольних мір твердості.

Об'єкт дослідження – міри твердості контрольні.

Предмет дослідження – нормативне забезпечення процедури підтвердження метрологічних характеристик контрольних мір твердості.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено програми та методики підтвердження метрологічних характеристик на міри твердості контрольні.

МЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ, ВИПРОБУВАННЯ НА ТВЕРДІСТЬ, ПРИЛАД  
ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ВІДБИТОК, ПОХИБКА РЕЗУЛЬТАТІВ

## **ABSTRACT**

The master's qualification work consists of 77 sheets, including 7 figures, 2 tables, a bibliography of 53 sources on four sheets, one appendix on 12 sheets.

Modern hardness testing methods were developed and put into operation in the 20th century, while the measurement methods remain unchanged, only the testing equipment is modernized. Thanks to the emergence and development of new computing technologies and equipment, new portable methods of hardness testing began to spread on the market, which allow for quick indiscriminate control of the characteristics of products of complex shape, as well as to carry out measurements in hard-to-reach places.

The purpose and tasks of the work. The purpose of the work is to ensure the accuracy and reliability of the results of the control of the mechanical properties of the measuring equipment based on the development of the program and the method of confirming the metrological characteristics of the hardness test.

To achieve the set goal, the following tasks were set and solved in the work:

1. Analysis of the properties of materials and the issue of measuring their hardness in engineering.
2. Study of the current state of development of hardness measurement methods.
3. Study of the current state of development of hardness measurement methods.
4. Development of a program and methodology for confirming the metrological characteristics of control measures of hardness.

The object of the research is control hardness measures.

The subject of the study is the regulatory support of the procedure for confirming the metrological characteristics of control measures of hardness.

Practical significance of the obtained results.

1. Programs and methods for confirming the metrological characteristics of control hardness measures have been developed.

**METALLIC MATERIALS, HARDNESS TESTING, IMPRESSION TESTING DEVICE, ERROR OF RESULTS**

## ЗМІСТ

	с.
Вступ.....	4
Розділ 1 Властивість матеріалів та питання вимірювання їх твердості в інженерній справі.....	8
1.1 Успішне використання металів в інженерних дослідженнях та розробках.....	8
1.2 Деформація металів.....	12
1.3 Міцність металів.....	17
1.4 Твердість як розрахункова властивість матеріалів.....	22
1.5 Висновок.....	24
Розділ 2 Дослідження сучасного стану розвитку методів вимірювання твердості.....	25
2.1 Загальний аналіз методів вимірювання твердості.....	25
2.2 Аналіз апаратної реалізації динамічних методів вимірювань твердості та їх метрологічне забезпечення.....	34
2.3 Висновок.....	39
Розділ 3 Дослідження вимог міжнародного стандарту ISO 6508-2.....	41
3.1 Сфера застосування.....	41
3.2 Пряма перевірка випробувальної машини.....	42
3.3 Непряма перевірка випробувальної машини.....	45
3.4 Пряме калібрування та повірка алмазного індентора.....	47
3.5 Непряма перевірка алмазних інденторів.....	48
3.6 Кульковий індентор.....	50
3.7 Інтервали між прямим і непрямим калібруванням і повіркою.....	51
3.8 Звіт про перевірку.....	51
3.9 Висновок.....	52
Розділ 4 Розроблення програми та методики підтвердження метрологічних характеристик мір твердості контрольних.....	53



	3
4.1 Загальні положення.....	53
4.2 Розгляд технічної документації.....	53
4.3 Експериментальні дослідження.....	54
4.4 Засоби атестації.....	54
4.5 Умови проведення атестації.....	55
4.6 Підготовка до атестації.....	55
4.7 Методика досліджень.....	56
4.8 Оформлення результатів атестації.....	57
4.9 Періодична повірка.....	57
4.10 Висновок.....	58
Висновки.....	59
Перелік джерел посилань.....	61
Додаток А Проект нормативного документу.....	65

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Захист прав споживачів та захист навколишнього середовища, охорона здоров'я, контроль якості та управління безпекою продукції є ключовими питаннями, які, на сьогодні, ретельно вирішуються. Для того, щоб відповідати вимогам міжнародних ринків, стандарти та норми, такі як ISO, застосовують випробувальні та інспекційне устаткування у величезній кількості в різних галузях економіки. Вони допомагають підтримувати здоров'я людини та індивідуальне благополуччя, запобігаючи нещасним випадкам і пошкодженням, підвищуючи рівень комфорту та задоволення, а також забезпечуючи душевний спокій. Крім того, випробувальні машини дають дані, які служать для спрямування досліджень і розробок до вдосконалення матеріалів і продуктів.

Твердість є однією з найважливіших механічних характеристик матеріалів. Її вимірювання широко використовуються в промисловості під час контролю технологічних процесів, визначенні експлуатаційних характеристик виробів, виборі режимів обробки та типу різального інструменту.

Людська цивілізація вже дуже давно використовує випробування на твердість матеріалів в тому чи іншому вигляді. Наприклад, проба зубів металевих монет з метою відрізнити справжні монети від фальшивих відома з археологічних і літературних джерел принаймні з давніх часів. Однак наукові лабораторні випробування матеріалів на твердість вперше були проведені в 1722 році Ремуром [1], а випробування на твердість були загальноприйняті як метод визначення механічних властивостей матеріалів тільки в 1901 році, після публікації роботи Брінелля [2].

Використання механічних методів випробування твердості в даний час набуло надзвичайно широкого поширення. Вони дозволяють:

- 1) легко та швидко перевіряйте обмежену кількість металу;
- 2) проводити механічні випробування, коли практично ніякі інші методи не можуть бути використані з тих чи інших причин;

3) випробувати матеріали практично без пошкоджень (інші методи механічних випробувань супроводжуються безповоротним пошкодженням досліджуваного зразка матеріалу);

4) використовувати зразки з попередньою обробкою лише невеликої ділянки поверхні матеріалу;

5) визначити твердість 8 мікропоперечних перерізів і мікрооб'ємів, наприклад, у структурних складових, окремих фазах або шарах матеріалу;

6) використовувати компактні прилади, вимірювати твердість безпосередньо на працюючому обладнанні, застосовуючи автоматику та інтеграцію з цифровими комп'ютерами;

7) Легко встановити емпіричний або аналітичний зв'язок між отриманими результатами та даними інших досліджень.

Сучасні методи випробування твердості були розроблені і введені в експлуатацію в ХХ столітті, при цьому методи вимірювань залишаються незмінними, модернізується лише випробувальне обладнання. Завдяки появі і розвитку нових обчислювальних технологій і устаткуванню на ринку стали поширюватися нові портативні методи випробування твердості, що дозволяють оперативно здійснювати безвибірковий контроль характеристик виробів складної форми, а також проводити вимірювання у важкодоступних місцях.

Поява нових методів і засобів вимірювання ставить питання про порівняння результатів вимірювань твердості зі значеннями, отриманими за шкалами Віккерса, Роквелла і Бріннелла.

На сьогоднішній день в Україні калібрування приладів проводиться на окремих матеріалах і об'єктах, які необхідно вимірювати в рамках однієї організації. Цей метод не можна вважати оптимальним або навіть прийнятним, так як достовірні результати можна отримати тільки за допомогою конкретних моделей приладів на певних об'єктах, для яких проводилися зразки.

Більш перспективним вирішенням цієї проблеми є стандартизація цих методів, що дозволить без ризику використовувати різні моделі твердомірів

(що відповідають вимогам стандарту) з однаковими результатами для всіх класів матеріалів, а також перераховувати значення твердості з нової шкали в загальноприйнятій за допомогою затверджених таблиць.

**Мета та завдання роботи.** Метою роботи є забезпечення точності та достовірності результатів контролю механічних властивостей засобів вимірювальної техніки на основі розроблення програми та методики підтвердження метрологічних характеристик на міри твердості контрольні.

Для досягнення поставленої мети в роботі були встановлені та вирішені наступні **завдання**:

1. Аналіз властивостей матеріалів та питання вимірювання їх твердості в інженерній справі.
2. Дослідження сучасного стану розвитку методів вимірювання твердості.
3. Дослідження сучасного стану розвитку методів вимірювання твердості.
4. Розроблення програми та методики підтвердження метрологічних характеристик контрольних мір твердості.

**Об'єкт дослідження** – міри твердості контрольні.

**Предмет дослідження** – нормативне забезпечення процедури підтвердження метрологічних характеристик контрольних мір твердості.

**Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблено програми та методики підтвердження метрологічних характеристик на міри твердості контрольні.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати дослідження, що виносяться на захист, одержані автором самостійно або за його активної участі.

**Апробація роботи.** Немає.

**Публікації.** Підготовлено тези доповіді на XI Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні технології у промисловому виробництві (СТПВ-2024)».

**Структура й обсяг кваліфікаційної роботи магістра.** Робота складається із вступу, чотирьох розділів, переліку джерел посилань. Обсяг кваліфікаційної роботи магістра (без врахування додатків) становить 65 аркушів, у тому числі 7 рисунків, 2 таблиць, бібліографії із 53 джерела на 4 аркушах. Один додаток на 12 аркушах.

## РОЗДІЛ 1

### ВЛАСТИВІСТЬ МАТЕРІАЛІВ ТА ПИТАННЯ ВИМІРЮВАННЯ ЇХ ТВЕРДОСТІ В ІНЖЕНЕРНІЙ СПРАВІ

#### **1.1 Успішне використання металів в інженерних дослідження та розробках**

Успішне використання металів в інженерних розробках залежить від здатності металу відповідати вимогам проектування та обслуговування та бути виготовленим за потрібними розмірами. Здатність металу задовольняти цим вимогам визначається механічними і фізичними властивостями металу.

Фізичні властивості – це ті, які зазвичай вимірюються методами, що не вимагають прикладання зовнішньої механічної сили (або навантаження). Типовими прикладами фізичних властивостей є щільність, магнітні властивості (наприклад, проникність), теплопровідність і теплодифузійність, електричні властивості (наприклад, питомий опір), питома теплоємність і коефіцієнт теплового розширення. Механічні властивості, основна увага в цьому томі, описуються як взаємозв'язок між силами (або напруженнями), що діють на матеріал, і стійкістю матеріалу до деформації (тобто деформацій) і руйнування. Ця деформація, однак, може бути помітною, а може і не бути помітною в металі після зняття прикладеного навантаження.

Різні типи випробувань, які використовують прикладену силу, використовуються для вимірювання таких властивостей, як модуль пружності, межа текучості, пружна та пластична деформація (тобто подовження), твердість, стійкість до втоми та в'язкість руйнування.

Механічні властивості сильно залежать від мікроструктури (наприклад, від розміру зерен, розподілу фаз, вмісту другої фази), типу кристалічної структури (тобто розташування атомів) і елементного складу (наприклад, вмісту легуючих елементів, рівню домішок). Поширеною ілюстрацією взаємозв'язку між мікроструктурою та механічними характеристиками є часто

спостерігається збільшення напруги зі зменшенням розміру зерна. Такі взаємозв'язки між структурою металу та експлуатаційними характеристиками роблять визначення механічних властивостей важливим для широкого спектру конструкційних застосувань у металообробці, аналізі та запобіганні відмовам, а також у розробці матеріалів для передових застосувань.

Далі коротко представлено типові взаємозв'язки між металургійними особливостями (такими як кристалічні структури та мікроструктури) та механічною поведінкою металів. На базових прикладах представлено механізми деформації та руйнування. Типові властивості, виміряні під час механічних випробувань, пов'язані з цими механізмами деформації та мікроструктурами металів.

На самому базовому рівні металеві матеріали (як і багато неметалічних), як правило, є кристалічними твердими тілами, хоча можна виробляти аморфні метали (тобто ті, що мають випадкове атомне розташування) в обмежених кількостях. Основним будівельним блоком кристалічної решітки є елементарна комірка. Повторюючи це розташування в трьох вимірах, утворюється кристалічна решітка.

Хоча розташування атомів у просторі може бути чотирнадцяти різних типів (або решіток Браве), більшість металів мають:

- гранецентровані кубічні (ГЦК) (наприклад, нікель, алюміній, мідь, свинець);
- об'ємно-центровані кубічні (ОЦК) (наприклад, залізо, ніобій, вольфрам, молібден);
- гексагональні щільноупаковані (ГКП) (наприклад, титан, магній, цинк); структури як структуру одиничної комірки. У дуже специфічних сферах застосування матеріали можуть бути використані як монокристали, де цілий компонент виготовляється з однією просторовою орієнтацією, що повторюється на всьому протязі.

Однак найчастіше інженерні матеріали зазвичай містять багато кристалів, або зерен. Залежно від складу та термомеханічної обробки, ці зерна зазвичай мають розмір приблизно від 1 до 1000 мкм (хоча дрібніші розміри зерен можна отримати за допомогою інших методів). У той час як кристалічна решітка всередині зерна постійна, орієнтація кристалів змінюється від одного зерна до іншого.

Хоча для деяких неструктурних застосувань можуть знадобитися чисті метали через певні переваги фізичних властивостей, додавання легуючих елементів зазвичай виготовляється з метою покращення механічних властивостей або інших характеристик матеріалу (наприклад, корозійної стійкості).

Металеві сплави можуть складатися з більш ніж десяти різних елементів в певних концентраціях з метою оптимізації різних властивостей. Незначні легуючі добавки, як правило, не змінюють основну кристалічну структуру, поки елементи залишаються в твердому розчині. При досить високих концентраціях інші фази (з однаковими або різними кристалографічними формами) можуть випадати в осад всередині основного металу (на границях зерен або в надрах зерна).

Фазові діаграми використовуються металургами та інженерами-матеріалознавцями для розуміння меж рівноважної розчинності в інженерних сплавах та прогнозування фаз, які можуть утворюватися під час термомеханічної обробки. Елементи твердого розчину та осади / частинки часто використовуються при проектуванні сплаву для підвищення міцності металу.

Також можуть бути виготовлені композити з металевою матрицею, в яких різномірні компоненти (наприклад, кераміка та інтерметаліди) включені в металеву мікроструктуру для покращення механічних властивостей. Наприклад, армуючий матеріал, який потрібно розсіяти по суцільній металевій матриці, при цьому метал становить 50 % або більше від загального обсягу.



Хоча в прикладі в якості арматури показані частинки, ці матеріали можуть бути виготовлені з вусами, короткими волокнами або довгими волокнами (наприклад, стрижнями або нитками). Обробка цих композитів, як правило, тягне за собою включення армуючого матеріалу в метал за допомогою методів металургії злитків або порошкової металургії.

Для інженера-конструктора, або в макроскопічній перспективі ( $1\times$ ), більшість металів здаються суцільними, однорідними та ізотропними. Безперервність передбачає, що структури не містять пустот; однорідність передбачає, що мікроструктура (у вигляді  $\sim 100\text{--}1000\times$ ) і властивості будуть однаковими у всіх місцях. Ізотропна поведінка передбачає, що властивості однакові у всіх орієнтаціях. Хоча ці припущення були використані в механіці суцільних середовищ для вивчення міцності матеріалів і конструкцій під навантаженням, інженерні матеріали часто є неоднорідними та анізотропними.

Хоча такі неоднорідності бажано мінімізувати, часто їх неможливо повністю усунути. Як обговорювалося вище, мікроструктурна оцінка зазвичай показує, що матеріали складаються з сукупності зерен унікальної кристалічної структури і зазвичай мають другі фази (з різними властивостями), розсіяні по всій материнській структурі. Як правило, матеріали мають відмінності у розмірі зерен, розмірі та розподілі другої фази, а також хімічному складі, особливо у бінарних сплавах та сплавах вищого порядку.

Технологія виготовлення також може відігравати ключову роль у впливі на бажану кристалографічну орієнтацію (або текстуру) зерен, що ще більше сприяє неоднорідності та анізотропії мікроструктури.

Всі ці мікроструктурні особливості можуть сильно впливати на властивості, виміряні під час механічних випробувань.

Коли на метали діє зовнішня сила, реакція буде залежати від ряду факторів. Тип навантаження (наприклад, розтяг, стиснення, зсув або їх комбінації) є одним з ключових факторів. Швидкість деформації, температура, характер навантаження (монотонні або змінні втомні напруги), наявність

насічок також впливатимуть на реакцію металу на деформацію. Хімічні впливи, такі як ті, що пов'язані з корозійним розтріскуванням під напругою (SCC) і водневою крихкістю, а також фізичні зміни, такі як ті, що виникають в результаті радіаційного пошкодження, можуть впливати на поведінку деформації. Нарешті, розмір зразка та підготовка поверхні можуть впливати на реакцію, що спостерігається під час механічних випробувань.

## 1.2 Деформація металів

Основні принципи деформації та руйнування можуть бути описані за допомогою одновісного випробування на розтяг (або розтяг). Детальний огляд випробувань на розтяг представлений далі в цьому Volume; Тому наводиться лише коротка характеристика з метою впровадження механізмів деформації і руйнування в металах. Як правило, випробування на розтяг проводяться на зразках циліндричної форми (наприклад, стрижні) або зразках з параллельними трубами (наприклад, лист і пластина), як показано на рис. 1 (а). Зразки завантажуються одноаксіально, по довжині зразка. Одночасно вимірюється прикладене навантаження і розтягнення (або зміна довжини) зразка.

Навантаження і переміщення використовуються для розрахунку інженерних напружень ( $S$ ) і інженерних деформацій ( $e$ ) з використанням формул (1.1) та (1.2):

$$S = P/A_0, \quad (1.1)$$

$$e = \Delta L/L_0 = \frac{(L_i - L_0)}{L_0}, \quad (1.2)$$

де  $P$  – прикладене навантаження;

$L_0$  – початкова довжина калібру;

$L_i$  – миттєва довжина калібру;

$A_0$  – початкова площа поперечного перерізу калібру;

$\Delta L$  – зміна довжини.

Цей аналіз полегшує порівняння результатів, отриманих при випробуванні зразків, що відрізняються товщиною або геометрією. (Для достовірності зразки повинні відповідати певним специфікаціям конструкції, як детально описано далі в цьому томі.) Хоча ці інженерні значення є достатніми, найкращими показниками реакції матеріалу на навантаження є справжнє напруження ( $\sigma$ ) і справжня деформація ( $\epsilon$ ), що визначаються миттєвими розмірами зразка на розтяг за виразами (1.3) та (1.4):

$$\sigma = P/A_i = S(1+e), \quad (1.3)$$

$$\epsilon = \ln\left(L_i/L_0\right) = (1+e), \quad (1.4)$$

Оскільки миттєві розміри зразка зазвичай не вимірюються, справжнє напруження та справжня деформація можуть бути оцінені за допомогою інженерного напруження та інженерної деформації (див. (1.1) та (1.2)). Відзначається, що ці оцінки справедливі тільки при рівномірному подовженні (див. Рис. 4) і не застосовні у всьому діапазоні деформацій.

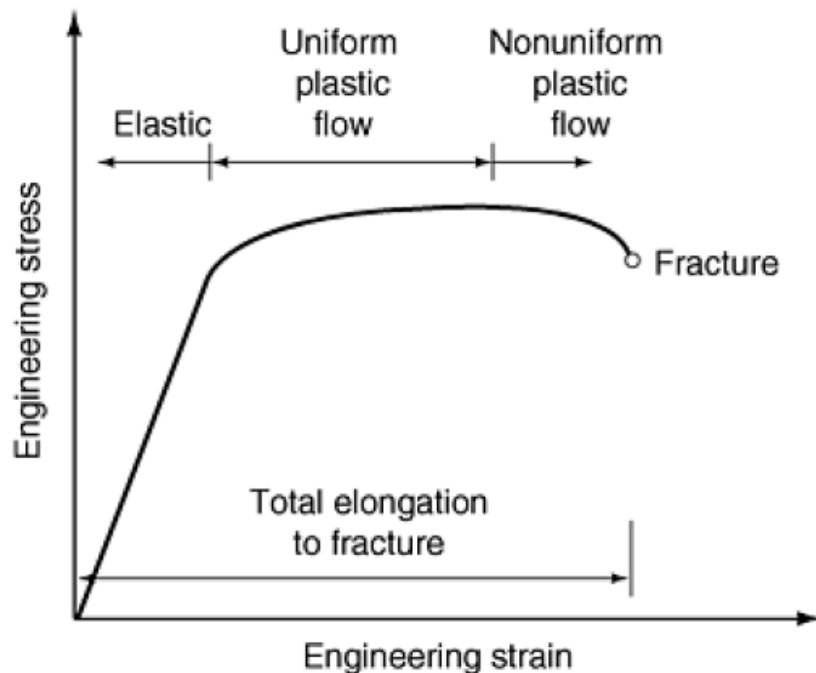


Рисунок 1.1 – Типова крива деформації інженерного напруження

На рис. 1.1 зображена типова крива деформації інженерного напруження проти інженерної, отримана під час одновісного випробування на розтяг.

На початкових стадіях деформації, як правило, напруга лінійно змінюється в залежності від деформації. У цій області будь-яка деформація вважається пружною, оскільки зразок повернеться до своєї початкової форми (тобто розмірів) при знятті прикладеної напруги. Якщо ж зразок не розвантажений і деформація триває, то крива напруги проти деформації стає нелінійною. У цей момент починається пластична деформація, що викликає постійне подовження, яке не відновиться після вивантаження зразка. Напруга, при якій відбувається постійна деформація, називається пружною (або пропорційною) межею; Однак межа текучості зі зміщенням (наприклад, зміщення 0,2 %) зазвичай використовується для кількісної оцінки початку пластичної деформації через простоту та стандартизацію вимірювання. Межа текучості при розтягуванні більшості сплавів становить близько 102 до 103 МПа:

- від 135 до 480 МПа (20–70 ksi) для низьковуглецевих сталей
- від 200 до 480 МПа (30–70 ksi) для алюмінієвих сплавів
- від 1200 до 1650 МПа (175–240 ksi) для високоміцних сталей

Щоб зрозуміти різні режими деформації, необхідно розглянути структуру металу. Пружну деформацію можна концептуалізувати, вважаючи зв'язки між окремими атомами пружинами. Як вже говорилося вище, метал буде розтягуватися під дією навантаження, але повернеться в початкову форму після зняття цього вантажу, якщо відбудеться тільки пружна деформація. Подібно до того, як постійна пружина пов'язує силу з прикладеним переміщенням (тобто  $F = k \cdot x$ ), модуль пружності ( $E$ ) пов'язує напругу розтягування з прикладеною деформацією розтягування (тобто  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ) і є просто нахилом лінійної частини кривої напруги розтягування проти деформації розтягування, створеної під час випробування на розтяг. Таким чином, відмінності в вимірних модулях пружності для різних металів можуть

бути частково раціоналізовані відмінностями в атомних зв'язках між окремими атомами в кристалічній решітці.

Пластична деформація призводить до постійної зміни форми, тобто після зняття навантаження метал не повернеться до початкових розмірів. Це має на увазі постійне зміщення атомів всередині кристалічної решітки. Якщо припустити ідеальний кристал, то ця деформація може відбутися лише шляхом розриву всіх зв'язків одночасно між двома площинами атомів, а потім ковзання одного ряду (або площини) атомів по іншому. Виходячи з розрахунків з використанням теоретичної міцності зв'язку, цей процес призведе до межі текучості порядку від 104 до 105 МПа.

Ці міцності набагато більші, ніж ті, які зазвичай спостерігаються у реальних металів (102 МПа). Тому деформація повинна відбуватися іншим методом.

Навіть при самих ідеальних умовах росту кристалів метали не є кристалографічно досконалими. Натомість решітка може містити багато недосконалостей. Однією з таких недосконалостей є крайова дислокація, яку для простих кубічних структур можна розглядати як додаткову півплощину атомів. Області, що оточують дислокацію, можуть являти собою ідеальний масив атомів. Однак ядро дислокації показано як локалізоване спотворення кристалічної решітки. Хоча може здатися, що ця структура несприятлива, в металах необхідні вивихи. Наприклад, на кордонах зерен дислокації «геометрично необхідні», щоб окремі зерна різної орієнтації могли зіставитися.

Характер і кількість дислокацій стають невід'ємним аспектом пластичної деформації. Існує два загальних типи дислокацій, ребро і гвинт, які в першу чергу розрізняються за способом проходження кожного з них через металевий кристал. Відзначено, що найчастіше спостерігаються вивихи змішаного характеру. У загальному випадку обидва типи дислокацій тягнуть за собою ступінчастий рух дислокації по кристалічній решітці на відміну від зміщення цілої площини над іншою. Це означає, що за один раз розривається

лише один набір зв'язків, а не ціла площина. Рух тепер відбувається на окремій множині систем ковзання, які є комбінаціями площин.

Аналогічним чином, відмінності у властивостях між різними типами металів (наприклад, залізо проти алюмінію або титану) можуть бути пов'язані з активними системами ковзання в кожному металі та відносною легкістю, з якою дислокації можуть переміщатися в системах ковзання.

Рух у системі ковзання регулюється критичною розв'язаною міцністю на зсув ( $\tau$ ). Для монокристала досягнення  $\tau$  на заданій системі ковзання пов'язане з геометричною залежністю між прикладеним навантаженням і системою ковзання. Математично цей зв'язок описується законом Шміда:

$$\tau \cdot R = (P/A) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda, \quad (1.5)$$

У полікристалічних металах пластична течія, як правило, не відбувається при постійній напрузі. На противагу цьому, для отримання додаткової деформації необхідно докласти підвищену напругу, як показано на рис. Цю тенденцію можна раціоналізувати, розглянувши рух, взаємодію та множення дислокацій. У міру того, як пластичний потік триває, число дислокацій збільшується, як правило, параболічним способом. Ці дислокації починають взаємодіяти один з одним і з такими поверхнями, як межі зерен. Коли дислокація стикається з межею зерен, рух зазвичай припиняється. Незважаючи на те, що може відбуватися пряма передача на сусіднє зерно, частіше дислокації починають накопичуватися на межі зерна і можуть утворюватися клубки дислокацій. У міру того, як це накопичення триває, розвивається напруга спини, яка протистоїть руху додаткових вивихів, що призводить до загартовування.

Як правило, робоче зміцнення металу обчислюється шляхом припущення параболічної відповідності справжнім даним напруження проти істинної деформації, як запропоновано в виразі (1.6)

$$\sigma = K \cdot \varepsilon \cdot n, \quad (1.6)$$

де  $K$  – коефіцієнт міцності;

$n$  – показник деформаційного зміцнення.

Справжнє напруження і справжня деформація, виміряні (або обчислені на основі (1) – (4)), можуть бути використані для визначення показника деформаційного зміцнення ( $n$ -значення). Цей показник є простим нахилом, обчисленим після побудови логарифма справжнього напруження проти логарифма істинної деформації:

$$\log \sigma = n \cdot \log \varepsilon + \log K, \quad (1.7)$$

Як буде розглянуто далі в цьому томі, величина показника деформаційного зміцнення стає важливою при прогнозуванні реакції металів на деформацію при первинній металообробці, а також при формуванні кінцевих компонентів.

На кривій напруги проти деформації є точка, в якій загартування вже не може компенсувати збільшення локального напруження, що виникає при зменшенні площі поперечного перерізу. У цей момент виникає нерівномірний пластичний потік, в якому деформація зосереджена в одній області, званої шийкою. Вирівнювання горловини в зразку на розтяг зазвичай збігається з максимальною напругою (тобто межею міцності на розрив) на кривій інженерної напруги проти інженерної деформації.

### 1.3 Міцність металів

До сих пір механічні властивості кристалічних металів обговорювалися тільки у зв'язку з кристалічною решіткою. Оскільки більшість металів складаються з безлічі зерен, такі властивості, як межа плинності і пластичність

(тобто подовження до руйнування), також сильно залежать від мікроструктури. Знову ж таки, вплив обох цих факторів можна раціоналізувати, розглянувши рух вивихів. Міцність металу пов'язана з легкістю або, навпаки, складністю дислокаційного руху. Якщо рух вивиху розгальмований (тобто рух ініціюється легко і продовжується безперешкодно), то сила буде низькою і відбудеться відносно невелике затвердіння. Навпаки, наявність перешкод або бар'єрів всередині мікроструктури уповільнює рух дислокації, що призводить до збільшення міцності.

Межі зерен є перешкодою для руху дислокацій. Зі зменшенням розміру зерен міцність ( $\sigma$ ) металу зазвичай зростає.

$$\sigma = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}, \quad (1.8)$$

де  $\sigma_0$  – внутрішня міцність металу;

$k$  – коефіцієнт;

$d$  – діаметр зерна.

При малих розмірах зерен існує більша ймовірність дислокаційно-дислокаційних взаємодій (наприклад, «нагромадження» дислокації на границях зерен), що призводить до більшого опору руху дислокації. Зі збільшенням розміру зерен опір руху дислокації, обумовлений зворотними напруженнями, пов'язаними з переплетеннями дислокацій на границях зерен, зменшується за рахунок більших відстаней між межами зерен. Тому менша міцність крупнозернистого металу в порівнянні з дрібнозернистим може бути раціоналізована зменшенням опору руху дислокації.

Міцність металу також буде пов'язана з вмістом домішок. Іноді до металів навмисно додають елементи, наприклад, додають нікель до міді або фосфор до сталі. В інших випадках наявність домішок, таких як включення (наприклад, оксиди) в міді або розчиненому вуглеці в сталі, може бути



небажаною. Для того, щоб обґрунтувати ці твердження, необхідно розглянути вплив кожного з них на пластичний потік металів.

Через невідповідність розмірів атома між атомом заміщення і атомом матриці решітка може стати локально напруженою. Ця деформація решітки може перешкоджати руху дислокації і умовно вважається джерелом зміцнення твердого розчину в металах. У загальному випадку приріст зміцнення змінюється пропорційно невідповідності в розмірах атомів і властивостях (зокрема, по модулю) між атомами розчиненої речовини і розчинника.

У металі також можуть бути присутніми інтерстиціальні атоми. При цьому атом значно менший за атоми матриці і розташовується в щілинах (або міжвузлях) кристалічної решітки. Найчастіше інтерстиціальні атоми можуть дифундувати до дислокаційного ядра за рахунок більш відкритої структури і локальних напружень розтягування в цій області кристалічної решітки. Наявність інтерстиціалу може гальмувати рух вивиху, що призводить до «замикання» вивиху. Це замикання вимагає більших прикладених напружень для створення дислокаційного руху та подальшої пластичної деформації). У класичному прикладі вуглецю в залізі такий механізм може призвести до розривного виходу. Деформація не є суцільною, і зазвичай спостерігається різка верхня межа текучості з подальшою плинністю при постійному напруженні. Зазубрини на кривій напруження проти деформації найчастіше пояснюються відривом дислокацій від атомів розчиненої речовини вуглецю. Якщо враховувати фізичний вигляд зразка на розтяг, локалізовані спотворення, які називаються фронтами Людерса (локальні області вихідного матеріалу), будуть перетинати довжину зразка під час подовження точки текучості, і безперервний пластичний потік при зростаючому навантаженні не почнеться, поки не піддасться вся секція калібру. Ступінь подовження точки текучості буде залежати від щільності рухливих дислокацій (тобто тих, які не «заблоковані») і легкості, з якою ці дислокації можуть переміщатися після початку.

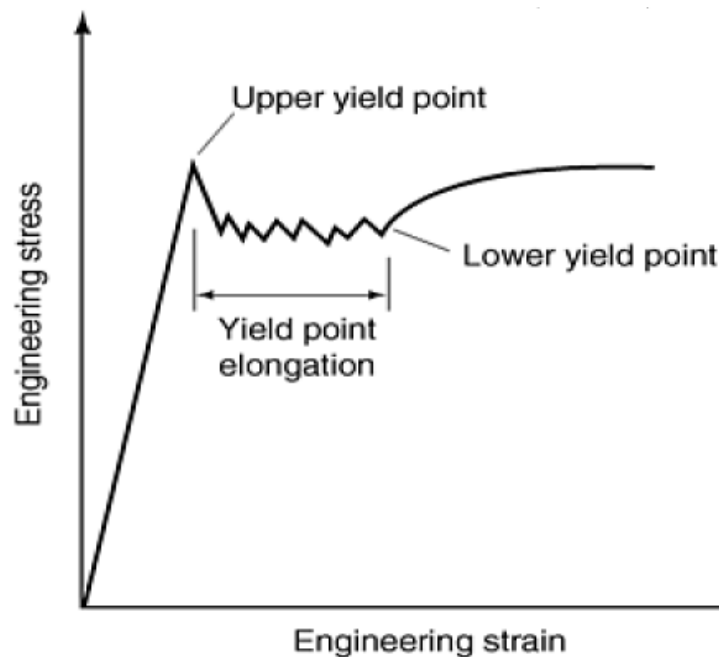


Рисунок 1.2 – Переривчастий вихід

Домішкові атоми та добавки до міжвузлових сплавів часто можуть спричинити присутність частинок або осаду другої фази в структурі. Дрібна дисперсія дрібних частинок, як правило, дає більш високу міцність, ніж груба дисперсія великих частинок. При кожній об'ємній частці дрібні частинки (10 Å) дають більш високу міцність, ніж великі (100 Å) частинки. Посилення пов'язане з двома факторами: (а) більшою ймовірністю перетину рухомої дислокації частинок через меншу відстань між частинками та (б) вищим опором руйнуванню менших частинок. І навпаки, зі збільшенням розміру частинок при постійній об'ємній частці відстань між частинками збільшується, в результаті чого частинки стають менш ефективними зміцнювачами (тобто бар'єрами для руху дислокацій). Такий ефект можна спостерігати в гарячекатаних, низьковуглецевих сталях. При низьких температурах згортання зазвичай утворюються більш дрібні карбіди (наприклад,  $\text{Fe}_3\text{C}$  і  $\text{NbC}$ ), що призводить до підвищення міцності. При більш високих температурах намотування частинки карбіду грубіють при постійній об'ємній частці, що зазвичай призводить до зниження міцності.

Аналогічний сценарій відбувається і з алюмінієвими сплавами, що тверднуть від старіння. Міцність цих сплавів змінюється в залежності від часу при постійній температурі. Межа плинності спочатку пропорційно зростає з часом, але з часом досягає максимуму. Більш тривалий час витримки призводить до зниження межі плинності. Ці тенденції знову ж таки безпосередньо пов'язані з механізмами твердіння частинок. При короткому терміні витримки утворюються невеликі зв'язні осади, які є ефективними зміцнювачами. Надмірне старіння (тобто замочування понад максимальну межу плинності) призводить до грубіння частинок, а відстань між частинками збільшується, що призводить до зниження міцності.

Пластичному руйнуванню, як правило, передують напруження, що перевищують межу текучості, і зразки, що виходять з ладу, з великим зменшенням площі та зсувом або мікропустотою. Процес пластичного руйнування шляхом злиття мікропустот був описаний декількома авторами. Мікропорожнечі зароджуються переважно на частинках (наприклад, вклученнях, осадах), які присутні майже у всіх металах. Розмір і форма частинок, міжфазна міцність частинка-матриця і міцність потоку матриці впливають на механізм утворення пустот. Загалом, зародженню порожнеч шляхом розтріскування частинок сприяє збільшення розміру частинок, вища міжфазна міцність і наявність нерівноважних частинок. На противагу цьому, зародження порожнечі шляхом міжфазної декогезії більш вірогідне при менших частинках, слабших інтерфейсах і меншій силі потоку матриці. Після зародження порожнечі будуть рости в напрямку прикладеної напруги розтягування, а вторинні порожнечі також можуть зароджуватися на більш дрібних частинках.

Під час горловини може відбуватися розширення пустот, що призводить до злиття шляхом імпінджменту порожнечі (що призводить до більш високої рівномірної деформації) або утворення листа порожнечі (нижча, більш

локальна деформація). Після невдачі зазвичай спостерігається «ямочка» поверхня перелому.

В результаті пластичність металу зазвичай зменшується зі збільшенням вмісту частинок, як показано на рис.16. Збільшення об'ємної частки частинок призводить до збільшення числа потенційних ділянок зародження порожнеч. Крім того, підвищується ймовірність зчеплення сусідніх порожнеч (імпінджмент) пластична поведінка. Розщеплення, один з режимів крихкого руйнування, відрізняється поділом окремих зерен уздовж кристалографічних площин з низьким індексом трансгранулярним способом – наприклад, залізни розщеплюють уздовж (100) площин. Лінії на гранях розщеплення, як видно на скануючому електронному мікроскопі (SEM), надають посмертні докази напрямку росту тріщини (тобто лінії простежуються до початку походження руйнування). Кожна «лінія» фактично є сходинкою, створеною між тріщинами, що поширюються вздовж паралельних площин з низьким індексом, але розділених невеликим кроком. Для чистого розщеплення сходинка, створена з кожного боку поверхні зламу, повинна прилягати один до одного, за винятком деякої невідповідності, яка може виникнути через деяку пластичність на сходинці. Ще одним способом крихкого руйнування є міжкристалітний злам. При цьому тріщина ініціюється на кордонах зерен і поширюється по ним. Грані межі зерен виглядають «скляно-гладкими», як на рис. Можуть бути ознаки локальної пластичності з помітним розривом на граничних кутах зерен. Слід зазначити, що також може виникати міжзерниста мікропустотна коалесценція, яка є локально пластичним розломом у прикордонних областях зерен.

#### **1.4 Твердість як розрахункова властивість матеріалів**

Механічні властивості матеріалів – це реакція матеріалу на прикладені механічні навантаження. Під дією прикладеної сили тіло змінює свою форму, тобто деформується. При деформаціях твердого тіла його частинки (атоми,

молекули, іони), що знаходяться у вузлах кристалічної решітки, зміщуються з положень рівноваги. Цьому зміщенню протидіють сили взаємодії між частинками твердого тіла, які утримують ці частинки на певній відстані один від одного. Тому при будь-якому типі деформації в організмі є внутрішні сили, які не дають йому деформуватися.

З точки зору механічних властивостей, виріб характеризується величиною деформації, що виникає у відповідь на прикладену силу, а матеріал характеризується відносною деформацією на одиницю довжини під дією питомої сили на одиницю площі, званої напругою. Відносна деформація - це безрозмірна величина, яка визначається як відношення подовження (стиснення) до вихідного розміру зразка.

Напруга – це сила, прикладена до одиниці площі поперечного перерізу зразка матеріалу або виробу. Основною характеристикою механічних властивостей матеріалу є взаємозв'язок між напругою і деформацією. Деформації прийнято ділити на пружні, якщо після припинення дії сили повністю відновлюються форма і об'єм тіла, пластичні, які розвиваються поступово і не зникають після припинення сили.

Розрізняють основні види деформації: розтяг і стиснення (односторонні і комплексні), згин, кручення і зсув. Якщо при деформації кузова перевищена межа напружень, звана межею міцності на розрив, зразок розбивається. Залежно від ступеня пластичної деформації до руйнування розрізняють два основних види руйнувань: крихкі і в'язкі. У разі в'язкого руйнування матеріал перед руйнуванням піддається не тільки пружній, але і значній пластичній деформації. При відсутності пластичної деформації або при її незначному розвитку відбувається крихке руйнування [5].

Твердість є однією з основних характеристик матеріалів і є узагальненою характеристикою пружно-пластичних властивостей матеріалів [5]. Вимірювання твердості широко використовуються в промисловості як при виборі технології і режимів обробки матеріалу, так і для оцінки технічного

стану виробів при їх виготовленні і подальшій експлуатації. Твердість найчастіше визначається як здатність матеріалу чинити опір проникненню в нього більш твердого тіла (індентора). При введенні індентора в випробувальний матеріал в приповерхневій області виникають механічні напруги, які залежать від прикладеного зусилля, форми індентора і параметрів циклу навантаження [33]. Залежно від величини цих напружень в поверхневому шарі металу відбуваються пружні, пружно-пластичні або пластичні деформації. Значення твердості визначають за величиною цих деформацій на поверхні досліджуваного зразка.

### **1.5 Висновок**

Відповідно до положень, сформульованих Н. Н. Давиденковим, механічні характеристики матеріалів можна умовно розділити на основні (первинні) і похідні (вторинні) [30]: «Перші взаємно незалежні, другі є лише функціями перших. До перших відносяться: межі пружності і плинності, тимчасовий опір (межа міцності на розрив), подовження і стиснення, функція зміцнення (іншими словами залежність опору деформації від величини деформації в лінійному напруженому стані), функція зміцнення і швидкості, межа втоми і багато інших. У другій групі ми зустрічаємося з характеристиками двох видів: тими, для яких повністю розкрито їх зв'язок з ознаками першої групи, і тими, для яких цей зв'язок, безсумнівно, існує, але ще не може бути безпомилково встановлений в сучасному стані наших знань: ударна міцність і, звичайно, твердість всіх видів. Незважаючи на значні досягнення в галузі фізики і механіки матеріалів, наведене вище твердження не втратило своєї актуальності.

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ

#### 2.1 Загальний аналіз методів вимірювання твердості

Під твердістю розуміють властивість матеріалу чинити опір пружній і пластичній деформації або руйнуванню, коли в нього вставляється інше, більш тверде і непостійне деформаційне тіло – індентор.

Методи визначення твердості в залежності від тимчасового характеру прикладання навантаження і вимірювання опору вдавлювань індентора поділяються на статичні, динамічні і кінетичні. Найбільш поширеними є статичні методи, при яких навантаження подається на індентор плавно і поступово, а час витримки під навантаженням регламентується нормативами для відповідних методів.

У методах динамічних випробувань на твердість випробувальний індентор діє на зразок з певною кінетичною енергією, витраченою на пружну віддачу та/або відбиток, а також багаторазовими втратами (вібрація, розсіювання тепла, тертя тощо). У цьому випадку твердість визначається по суті на основі оцінки витрат кінетичної енергії індентора. Динамічну твердість часто називають ударною твердістю матеріалу. Ударна твердість характеризує опір проникненню не тільки на поверхню зразка, але і в певний обсяг матеріалу. Метод дряпання також можна умовно віднести до динамічних методів.

Кінетичні методи визначення твердості засновані на безперервній реєстрації процесу інденторного вдавлювання з записом діаграми «інденторне навантаження - глибина індентора». Перспективність такого підходу полягає в реєстрації всієї кінетики процесу пружнопластичної деформації матеріалу при вдавлюванні індентора, а не тільки кінцевого результату випробування, як при інших методах.

За принципом прикладання навантаження методи визначення твердості можна розділити на вдавнення, відскок, дряпання і різання.

Способи відступу є найбільш поширеними. Твердість в даному випадку визначається як опір, який чинить випробувальне тіло на введення більш твердого індентора і відображає переважно стійкість матеріалу до пластичної деформації.

Методи визначення твердості по висоті відскоку бойка, що падає на досліджувану поверхню. При цьому твердість в основному відображає стійкість до пружної деформації. Випробування на твердість відскоку широко використовується для перевірки великих виробів і конструкцій за допомогою портативних пристроїв завдяки ефективності, зручності та простоті автоматизації та комп'ютеризації.

У методах дряпання та різання твердість визначається відповідно як стійкість матеріалу до подряпин або різання.

При всіх методах перевірки твердості дуже важливо правильно підготувати поверхню зразка. Чим менша глибина вдавнення індентора, тим вища обробка поверхні потрібна, і тим більше уваги необхідно приділити тому, щоб властивості поверхневого шару не були змінені нагріванням або затвердінням під час шліфування та полірування.

Результати випробувань на твердість для найбільш поширених статичних методів залежать від тривалості прикладання навантаження до індентора. Зазвичай час лежить в межах від 10 до 30 с.

При визначенні твердості всіма методами (крім мікротвердості) вимірюється інтегральне значення твердості матеріалу (усереднене для всіх компонентів конструкції). Тому отриманий відбиток після зняття вантажу повинен бути значно більшим, ніж розмір зерен та інших структурних компонентів матеріалу, що перевіряється.

Значення твердості не можуть бути використані безпосередньо для розрахунків деталей і не можуть бути однозначно переведені в значення



властивостей механічного матеріалу. Однак випробування на твердість є ефективним способом порівняння однотипних матеріалів між собою та способом контролю якості. Дуже перспективним є поєднання вимірювання твердості з іншими видами фізичних методів дослідження поверхні металевих матеріалів. При цьому відносні значення значень твердості дозволяють підтвердити (перевірити) і доповнити отримані результати більш складними методами.

Методи випробування твердістю можна класифікувати наступним чином (рис 2.1).

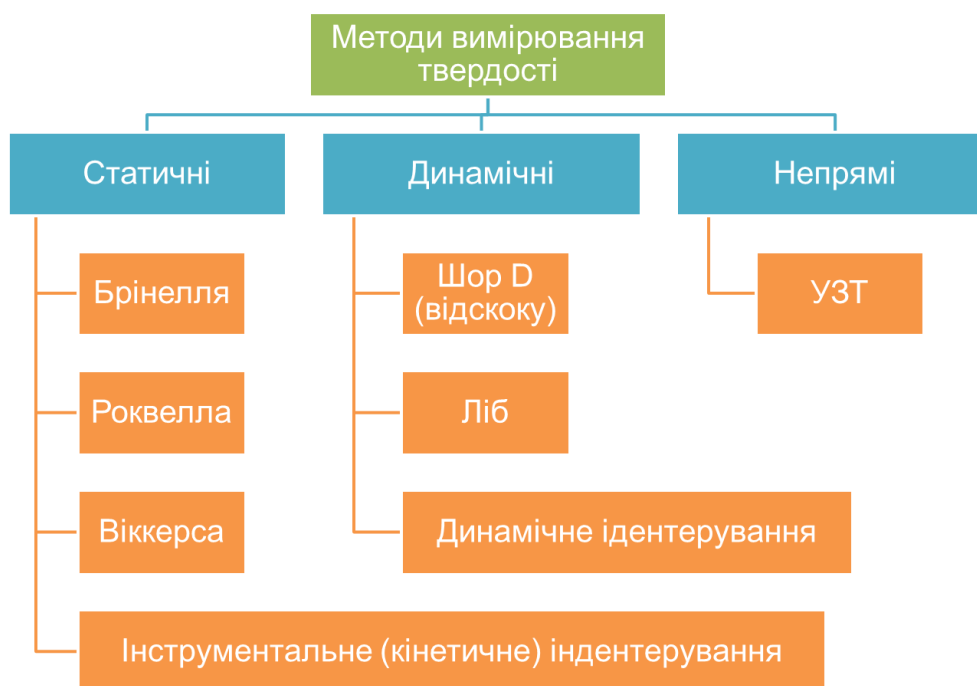


Рисунок 2.1 – Класифікація методів вимірювання твердості [46, 47]

Статична твердість характеризується швидкістю проникнення індентора  $< 0,1$  м/с. Значення твердості визначаються прямим вимірюванням геометричних розмірів відбитків (шкала Брінелля, шкала Віккерса, шкала Кнуппа) або глибиною введення індентора (шкала Роквелла, шкала інструментального вдавнення) [10-25]. Значення твердості (числа твердості)

визначаються співвідношенням прикладеного навантаження і геометричних розмірів відбитка.

Фізичний сенс статичної твердості полягає в стійкості матеріалу до пластичної деформації, коли повільніше (квазістатичне) дію більш твердого індентора відбувається повільно. Згідно з класифікацією Давиденкова, статична твердість, як вторинна характеристика матеріалу, є функцією наступних первинних характеристик матеріалу: межа плинності, межа міцності на розрив, коефіцієнт деформаційного зміцнення.

Вплив модуля пружності на величину вимірюваних значень твердості вважається незначним для пластичних матеріалів, таких як метали, зі значними ступенями деформації, які мають місце для більшості методів вимірювання твердості.

Різні шкали статичної твердості відрізняються формою індентора, діапазоном прикладеного навантаження, способом вираження чисел твердості в залежності від вимірюваних значень. Різниця в геометрії індентора призводить до різного ступеня деформації і, як наслідок, деформаційного зміцнення матеріалу, що особливо характерно для металів з високим ступенем деформаційного зміцнення. З цієї точки зору слід розрізняти самоподібні індентори, що забезпечують однакове (подібне) поле деформації на різній глибині заглиблення (піраміди Віккерса, Кнуппа, Берковіца) і індентори, що не забезпечують закон подібності (куля Брінелла, конус Роквелла). Це питання докладно розглядається Григоровичем в [28]. Для самоподібних інденторів можна очікувати, що значення твердості будуть однаковими при різних навантаженнях/глибинах вдавнення. У разі несамоподібних інденторів така рівність неможлива через різну ступінь деформації і деформаційного зміцнення. Однак навіть для самоподібних інденторів значення твердості при різних навантаженнях можуть змінюватися через неоднорідність механічних властивостей матеріалу по глибині, наприклад, внаслідок механічного впливу

на поверхню при обробці. Тому при вказівці вимірюваних значень твердості в обов'язковому порядку вказується назва шкали і прикладене навантаження.

Всі ці відмінності в шкалах твердості призводять до того, що не існує універсальних методів перетворення однієї шкали статичної твердості в іншу для всіх матеріалів. Фізично це означає, що різні матеріали по-різному чинять опір пластичній деформації при вставці інденторів з різною геометрією і глибиною.

Відповідно до класифікації, запропонованої Н.Н. Давіденковим [29], динамічні методи вимірювання твердості можна розділити на три основні групи:

- спосіб відбитка м'яча (або бойка з м'ячем на кінці) на поверхні зразка при ударі замість статичного тиску;
- метод пружної віддачі при ударі по об'єкту, що перевіряється, сталеву кулькою або спеціальним бойком;
- спосіб розгойдування сталеву або алмазну кулі, з'єднаної з певною масою (маятником) в гнізді виробленого ним відбитка.

На цей час маятникові методи гойдання не знайшли широкого застосування в промисловості, тому в подальшому розберемо методи відбитка і метод пружної віддачі.

Дактилоскопічний метод дуже близький до статичних методів. Відповідно до положень, викладених в роботі Д.Б. Гогоберідзе [6], методи, при яких твердість характеризується величиною відбитка, що дається стандартним ударним пристроєм в досліджуваному матеріалі, є перехідними від статичних методів вимірювання твердості до чисто динамічних. Результати вимірювань, отримані цими динамічними методами, аналогічні результатам, отриманим статичними методами. Твердість в цих методах пропорційна величині пластичної деформації, тому найменша зміна швидкості удару призводить до значної похибки в результатах вимірювань.

У цій же роботі [6] є дані про те, що рівняння Мейєра, а отже, і твердість металу залежать від швидкості удару індентора об досліджувану поверхню. У міру збільшення швидкості випробування до значень, що використовуються в динамічних методах,  $p$  зменшується і стає постійним і дорівнює мінімально можливому значенню цієї величини, що спостерігається в статичних випробуваннях. Це можна пояснити впливом обсягів металу, що беруть участь в пластичній деформації при ударному і статичному навантаженні: в разі удару площа (обсяг металу) деформації менше, але деформація сильніше, ніж в аналогічному випадку при статичному навантаженні. Якщо ступінь деформації в цьому меншому обсязі металу при динамічному навантаженні вище, ніж при статичному, то  $p$  в цьому випадку повинно бути менше.

Метод пружної віддачі. Існує спеціальна група методів визначення динамічної твердості (Шор, Ліб та ін.), де єдиним вимірюваним параметром є висота або швидкість відскоку ударника, оснащеного жорстким сферичним наконечником (індентором). За міру твердості береться висота відскоку або швидкість відскоку в умовних одиницях.

При зіткненні двох тіл в області контакту індентора і поверхні відбувається деформація, що призводить до утворення залишкового відбитка. Частина енергії удару витрачається на пластичну деформацію, решта енергії витрачається на пружну деформацію, повертається до ударника і піднімає його на висоту  $H_2$ . Оскільки висота падіння  $H_1$  і маса ударника  $t$  постійні, то висота відскоку  $H_2$  характеризує енергію пружного післядії або відновлення відбитка. Якщо пружна твердість виражається в одиницях висоти відскоку або в умовних одиницях довжини, яка в прихованому вигляді укладає вимір потенційної енергії ( $H^*mm$ ), то її буде важко порівняти з динамічною або статичною твердістю. У методі Шора пружна твердість виражається як відношення  $H_2/H_1$ .

Слід зазначити, що динамічна і пружна твердість не можуть бути в простому співвідношенні, так як динамічна твердість – це перш за все

специфічна робота пластичної деформації матеріалу індентором, а пружна твердість характеризує специфічну роботу пружного відновлення відбитка і визначається головним чином пружними характеристиками матеріалу.

При вимірюванні твердості статичними методами, такими як Брінелля, Віккерса або Роквелла, прикладання навантаження відбувається дуже повільно (від 5 до 15 с), тобто майже статично. Проте, як відомо з літератури про високошвидкісну деформацію [8, 9], пластичні властивості матеріалів сильно залежать від швидкості деформації для переважної більшості матеріалів. Іншими словами, межа плинності металів, встановлена при -5 високі швидкості деформації (близько 10 1/с у високошвидкісних процесах обробки) значно збільшуються порівняно з деформацією на квазістатичних швидкостях.

Д. Табор висунув розгорнуту теорію [7]. Він зазначив, що також слід враховувати енергію відскоку. По суті, якщо розглядається тільки постійна деформація, то вимірювати слід тільки відбиток, що залишився після відскоку (після пружного відновлення зразка). Інше сумнівне припущення полягає в тому, що опір вдавненню є постійним протягом усього процесу деформації, оскільки на практиці всі різні етапи процесу взаємодії індентора та зразка впливають на результат:

Крок 1: Поверхня пружно деформується. Якщо удар досить незначний, поверхня пружно відновиться і відскік ударника відбудеться без незворотної деформації. Взаємодія в цьому випадку є абсолютно пружною і може бути змодельована відповідно до рівнянь Герца для пружних взаємодій.

Крок 2: Якщо зіткнення таке, що межа пружності (межа плинності) металу перевищена, то відбудеться пластична деформація і взаємодія перестане бути абсолютно пружною. Пластична деформація починає відбуватися вже при гранично низькій енергії удару і зі збільшенням енергії удару швидко переходить в стан абсолютної пластичності.

Крок 3: При більш високій енергії удару відбувається повномасштабна пластична деформація, поки вся кінетична енергія ударника не буде поглинена.

Етап 4: Нарешті, в результаті зняття пружних напружень ударника відбувається відскік.

У порівнянні зі статичним вдавненням, тривалість прикладання навантаження при динамічних вимірюваннях твердості залежить від фрикційних властивостей і коефіцієнта відновлення (який сам залежить від швидкості удару) зразка і індентора.

Всі динамічні твердоміри мають одну спільну рису, а саме портативність, що дозволяє легко переносити їх на полігон.

Вимірювання можуть проводитися на великовантажних майданчиках, об'єктах вже діючих заводів або на деталях машин без їх демонтажу.

Розрізняють два типи динамічних твердомірів:

1) в яких розмір відбитка вимірюється оптичними методами, як в методі Брінелля;

2) при якому пружна реакція матеріалу оцінюється за параметрами відскоку ударного механізму.

Першою групою тестерів є такі компаратори, як Польші-Хаммер, Теле-Брінелль, Бауманн-Штайнрюк-Молот, тестер 8Yeag Rsh [8]. Всі вони оптично вимірюють розмір відбитка після динамічної експозиції. Отримані результати безпосередньо пов'язані з необхідним значенням статичної твердості, як правило, твердістю по Брінеллю. Завдяки низькій вартості деякі з цих твердомірів використовуються і сьогодні. Звичайно, точність і залежність від користувача є істотним недоліком, а кореляції в основному засновані на припущеннях статичних вимірювань, строго кажучи, не дійсних в умовах динамічного тестування. Прогрес у технологіях фактично допоміг замінити цей тип твердомірів.

Друга група тестерів фактично вимірює відскік бойка за допомогою індентора. Першим приладом такого типу є так званий склероскоп Шора,

винайдений в 1907 році Альбертом Ф. Шором. Бойок з алмазним наконечником опускається з певної висоти на поверхню матеріалу, що перевіряється. Висота відскоку є мірою твердості металу.

Відповідно до стандарту ASTM E 448 використовуються дві моделі приладу: модель С і модель В. Ці два твердоміри відрізняються ударними роликами (форма і вага) і висотою падіння. Шкала твердості склероскопів Шора складається з чисел, визначених шляхом ділення на 100 середньої висоти відскоку ударника від конкретного матеріалу, що випробовується. Таким чином, шкала твердості Шора визначається матеріалом, який використовується для калібрування (еталон) і моделлю твердоміра.

Слід бути обережним, щоб не переплутати різні шкали, наприклад, NRK8S-N8S і N8S-N8B. Крім того, використання різних молотків для однієї і тієї ж моделі твердоміра може привести до небажаних результатів. Як і у випадку з усіма іншими методами випробування на твердість, вимірювання повинні проводитися перпендикулярно поверхні, що перевіряється. У випадку з твердомірами Шора, де для прискорення ударника використовується тільки сила тяжіння, робота можлива тільки у вертикальному положенні.

На початку 1970-х років Дітмар Ліб вивчав різні методи вимірювання твердості, роблячи акцент на портативних приладах, таких як ті, що базуються на методах Бауманна-Штайнрюка, Шмідта та Шора. Найбільш часто використовуваними портативними твердомірами були твердоміри динамічного типу, де навантаження подається імпульсно. Постало питання про те, як збільшити діапазон вимірювань і розширити сферу застосування приладу без втрати точності, наприклад, незалежність від напрямку тестування, прискорення роботи, комфорт для користувачів.

Результатом роботи Ліба стало винахід нового динамічного методу і розробка пристрою в 1975 році у співпраці з компанією ESDYUT1R.

Суть методу полягає у вимірюванні відношення швидкостей  $V$ ; падаючий ударник до і після зіткнення з поверхнею випробуваного зразка.

Основна ідея Ліба полягає у вимірюванні швидкості удару та відскоку безконтактно – через ЕРС, створювану рухомим магнітом через котушку індуктивності, встановлену на направляючій трубці пристрою. Індукована ЕРС прямо пропорційна швидкості магніту, встановленого всередині бойка. Індукований сигнал ЕРС записується в електронний блок з індикатором, а пікові значення індукованої напруги використовуються для отримання чисел твердості Lib N. Форма хвилі індукованої ЕРС унікальна для кожного типу твердомірів.

## **2.2 Аналіз апаратної реалізації динамічних методів вимірювань твердості та їх метрологічне забезпечення**

Згідно з європейськими стандартами ISO 16859, твердомір, який використовується для вимірювання твердості Ліба, складається з ударного перетворювача та електронного вимірювального блоку, який визначає швидкості удару та відскоку ударника.

Перетворювач удару (рис. 2.2) складається з бойка (рис. 2.3), що складається зі сферичного наконечника, і корпусу, в який вбудований постійний магніт.



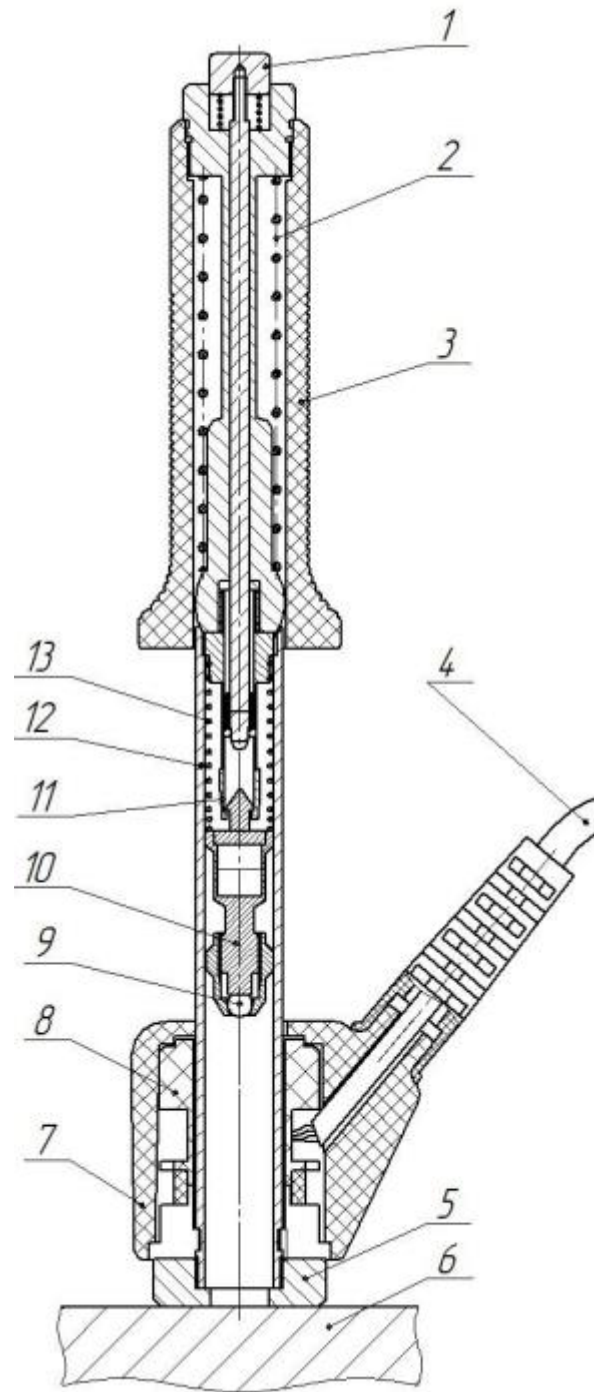


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення ударного перетворювача (тип Е) до удару (ударна пружина): 1 – кнопка розблокування; 2 – пружина взводу; 3 – трубка взводу; 4 – з'єднувальний кабель; 5 – опорне кільце; 6 – випробувальний зразок; 7 – корпус котушки індуктивності; 8 – котушка індуктивності; 9 – сферичний наконечник (індентор); 10 – ударник; 11 – цанга; 12 – направляюча труба; 13 – ударна пружина

Розглянемо принцип роботи ударного перетворювача типу Е (рис. 2.3). Нижня частина ударного перетворювача повинна бути щільно закріплена опорне кільце. Опорна поверхня повинна бути спроектована таким чином, щоб запобігти зміщенню датчика удару під час вимірювання. Процедура вимірювання полягає в наступному: Необхідно помістити зонд на досліджуваний зразок нормально до поверхні і притиснути його торцевою площиною до поверхні, не розгойдуючи. пружинний механізм перетворювача в робоче положення, зсунувши трубку взводу вниз до клацання, що вказує на те, що курок захоплює цангу. Плавно поверніть трубку взводу, уникаючи ударів і поломки ударника. Переконайтеся, що датчик стійко стоїть на поверхні випробуваного зразка, і натисніть кнопку розблокування датчика, яка звільняє ударник від цангової рукоятки та вдаряє по поверхні випробувального зразка під дією попередньо намотаної ударної пружини.



Рисунок 2.3 – Вимірювання ударним перетворювачем типу В

Ударник пролітає через котушку індуктивності і індукує в ньому ЕРС, амплітуди імпульсів  $E_1$  і  $E_K$  якої пропорційні  $U_A$  і (рис. 2.4). Котушку розташовують на трубці таким чином, щоб відстань від сферичного наконечника до поверхні досліджуваного зразка становила не більше 2 мм в момент вимірювання швидкості.



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд ударних перетворювачів для динамічних твердомірів лінійки EC)1UT1R (виробництва Rgosec SA, Швейцарія)



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд ударних перетворювачів Constanta [39]

Невеликі габарити, ергономічність і швидкість управління стали основними факторами, що забезпечили популярність і широке застосування динамічних твердомірів [36, 37, 38]. Широке застосування динамічних твердомірів ставить питання про порівняння результатів, отриманих

динамічними і статичними методами вимірювання твердості [47]. Проблема ускладнюється відсутністю стандартів методів, що призводить до відмінностей у конструкціях і параметрах перетворювачів. При цьому для більшості виробів, якщо є вимоги до твердості виробу, необхідні значення вказуються в стандартизованих статичних шкалах, і, як було сказано вище, числа твердості різних шкал не пов'язані між собою математичними залежностями [7].

Числа твердості  $H$  є первинними при вимірюваннях Ліба. Стандарти стосуються відповідності значень іншим шкалам твердості. Зокрема, ISO 16859-1 пункт 10 говорить: «Не існує загальної процедури точного перетворення шкали твердості Ліба в інші шкали твердості Ліба або інші (не лібські) шкали твердості...». Таких перетворень слід уникати, якщо немає надійного обґрунтування переходу з однієї шкали в іншу за допомогою порівняльних тестів».

В цей час метрологічне забезпечення вимірювань твердості Ліба засноване на простежуваності первинних еталонів, які відтворюють основні шкали цього методу. Такі стандарти існують принаймні в Німеччині та Китаї. Передача шкал твердості на робочі вимірювальні прилади забезпечується заходами, розробленими спеціально для методу Ліба.

В Україні динамічні твердоміри проходять випробування на допуск типу і вносяться до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки під виглядом твердомірів за стандартизованими шкалами (Брінелля, Віккерса, Роквелла). При цьому відбувається підміна понять, так як повірка проводиться за показниками твердості відповідних шкал для статичних твердомірів. По суті, шкала приладу калібрується шляхом коригування необхідних коефіцієнтів перерахунку таким чином, щоб його показання відповідали значенням вимірюваних заходів. У той же час, якщо такий прилад використовувати для вимірювання мір тієї ж шкали, але виконаного з іншого матеріалу, він буде давати неправильні значення. В результаті прилад видає правильні результати

вимірювань тільки на матеріалах, аналогічних тим, з яких проводилися вимірювання, на яких він був випробуваний. При цьому в описах типів, сертифікатах повірки та інструкціях з експлуатації таких пристроїв не вдалося знайти обмежень щодо їх застосовності для різних типів матеріалів. Таким чином, користувачів приладів вводять в оману щодо їх використання та метрологічних характеристик [44]. Цей факт представляється дуже небезпечним, враховуючи кількість пристроїв такого типу, що продаються в Україні і галузях, в яких вони застосовуються. На сьогоднішній день до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки включено понад п'яти десятків твердомірів, позначених як «динамічні», «переносні», «малогабаритні» або «переносні».

Негативні наслідки існуючої практики повірки твердомірів Ліба заходами інших шкал твердості в Україні проявляються і в тому, що вітчизняні «динамічні» твердоміри, які успішно пройшли повірку в Україні, не можуть використовуватися за кордоном, зокрема в Європі. Причиною цього є різниця в параметрах перетворювачів і калібрування приладів за статичними показниками твердості.

### **2.3 Висновок**

1. Проведено аналіз існуючих статичних і динамічних методів вимірювання твердості. Розглянуто фізико-методичні основи динамічних методів вимірювання твердості.

2. Розглянуто особливості апаратної реалізації методу Ліба та вимоги до основних метрологічних характеристик перетворювачів.

3. З усього вищесказаного випливає, що твердомір, який за своєю конструкцією, способом вимірювання, формою індентора, алгоритмом розрахунку твердості та іншими істотними параметрами не може бути перевірений за цією шкалою в рамках існуючих калібрувальних схем. Таким чином, практика використання динамічних твердомірів для контролю стану

сталевих і легуваних виробів при продовженні терміну служби високотехнологічного обладнання може стати причиною його виходу з ладу і виникнення аварійних ситуацій.

## РОЗДІЛ 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМОГ МІЖНАРОДНОГО СТАНДАРТУ ISO 6508-2

#### 3.1 Сфера застосування

Ця частина ISO 6508 визначає два окремі методи перевірки випробувальних машин (прямі та непрямі) для визначення твердості за Роквеллом відповідно до ISO 6508-1, а також метод перевірки інденторів твердості Роквелла.

Метод прямої перевірки використовується для визначення того, чи потрапляють основні параметри, пов'язані з функцією машини, такі як прикладена сила, вимірювання глибини та час циклу тестування, під задані допуски. Метод непрямой перевірки використовує ряд відкаліброваних еталонних блоків твердості, щоб визначити, наскільки добре машина може виміряти матеріал відомої твердості.

Непрямий метод може використовуватися самостійно для періодичної планової перевірки машини, що знаходиться в експлуатації.

Якщо випробувальна машина також буде використовуватися для інших методів випробування твердості, вона повинна бути перевірена окремо для кожного методу.

Ця частина ISO 6508 застосовна до стаціонарних і портативних машин для випробування твердості.

Звертається увага на те, що використання композиту з карбїду вольфраму для кулькових інденторів вважається стандартним типом кулі Роквелла. Сталеві кульки можна продовжувати використовувати лише за умови відповідності стандарту ISO 6508-1.

Перед перевіркою машини для випробування твердості Роквелла машину слід перевірити, щоб переконатися, що вона правильно налаштована та працює відповідно до інструкцій виробника.

Зокрема, слід перевірити, чи можна прикладати та знімати випробувальне зусилля без ударів, вібрації чи перевантаження та таким чином, щоб це не впливало на показання.

### **3.2 Пряма перевірка випробувальної машини**

Пряма перевірка передбачає калібрування та перевірку наступного:

- а) випробувальні сили;
- б) система вимірювання глибини;
- в) цикл випробувань;
- г) тест на машинний гістерезис.

Безпосередню перевірку слід проводити при температурі  $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ . Якщо перевірка проводиться за межами цього температурного діапазону, про це повідомляється в протоколі перевірки.

Прилади, що використовуються для калібрування, повинні відповідати національним стандартам.

Непряма перевірка відповідно до пункту 5 проводиться після успішної прямої перевірки.

Калібрування та перевірка випробувальної сили

Кожне попереднє випробувальне зусилля  $F_0$  і кожне сумарне випробувальне зусилля  $F$ , що використовується, повинні бути виміряні, і, коли це застосовно, це повинно бути зроблено не менше ніж у трьох положеннях плунжера, розташованих у всьому діапазоні його руху під час випробування. Попереднє випробувальне зусилля повинно проводитися не менше 2 с.

Для кожного зусилля в кожному положенні плунжера знімається три показання. Безпосередньо перед кожним зняттям показань поршень переміщують у тому ж напрямку, що й під час тестування.

Зусилля повинні вимірюватися одним з наступних двох методів:

- за допомогою пристрою для випробування сили відповідно до ISO 376 клас 1 або вище та відкалібрований для оборотності;



– балансуванням проти сили, з точністю до  $\pm 0,2 \%$ , прикладеної за допомогою каліброваних мас або іншим методом, що має таку ж точність.

Повинні бути наявні докази того, що потужність силового пристрою не змінюється більш ніж на  $0,2 \%$  в період від 1 с до 30 с після ступінчастої зміни сили.

Допустиме відхилення на кожному вимірюванні попередньої випробувальної сили,  $F_0$ , (до прикладання і після зняття додаткового випробувального зусилля,  $F_i$ ) має становити  $\pm 2,0 \%$ , див. Діапазон усіх вимірювань сили (найбільше значення мінус найменше значення) повинен становити  $< 1,5 \%$  від  $F_0$ .

Допустиме відхилення при кожному вимірюванні сумарної випробувальної сили,  $F$ , має становити  $\pm 1,0 \%$ . Діапазон вимірювань сили (найбільше значення мінус найменше значення) повинен становити  $< 0,75 \%$  від  $F$ .

Калібрування та повірка системи вимірювання глибини

Система вимірювання глибини повинна бути відкалібрована шляхом визначення поступових рухів індентора або індентора.

Блоки приладів або калібрів, що використовуються для перевірки системи вимірювання глибини, повинні мати максимальну розширену похибку  $0,0003$  мм при розрахунку з довірчою імовірністю  $95\%$ .

Калібруйте систему вимірювання глибини випробувальної машини не менше ніж з чотирма рівномірно розташованими кроками, що охоплюють весь діапазон нормальної робочої глибини, виміряної випробувальною машиною. Для цього робоча глибина становить  $0,25$  мм для звичайних шкал Роквелла (А, С, D, В, Е, F, G, Н, К) і  $0,1$  мм для поверхневих шкал Роквелла (N, T).

Деякі випробувальні машини мають систему вимірювання глибини з довгим ходом, де розташування робочого діапазону системи вимірювання глибини змінюється відповідно до зразка. Цей тип випробувальної машини повинен мати можливість електронним способом перевірити, чи пристрій для

вимірювання глибини є безперервним у всьому діапазоні. Ці типи тестувальників повинні бути перевірені за допомогою наступних кроків:

1. У приблизній верхній частині, середній і нижній точках загального ходу вимірювального приладу перевірте систему вимірювання глибини не менше ніж на чотирьох рівномірно розташованих кроках приблизно 0,05 мм у кожному з трьох місць.

2. Керуйте приводом у повному діапазоні його ходу, щоб перевірити, чи є вимірювання переміщення безперервним. Індикація переміщення повинна бути безперервно вказана в усьому діапазоні.

Система вимірювання глибини повинна правильно вказувати в межах  $\pm 0001$  мм для шкал від А до К і в межах  $\pm 0000$  5 мм для шкал N і T, тобто в межах  $\pm 0,5$  одиниці шкали, для кожного діапазону.

Калібрування та перевірка циклу випробувань

Цикл випробувань повинен бути відкалібрований виробником випробувальної машини під час виготовлення та під час ремонту, який міг вплинути на цикл випробувань. Калібрування повного циклу випробувань не потрібне в рамках прямої перевірки в інший час, див.

Цикл випробувань повинен відповідати циклу тестування, визначеному в ISO 6508-1:2015.

Для випробувальних машин, які автоматично контролюють цикл випробувань, похибка вимірювання ( $k = 2$ ) приладу синхронізації, що використовується для перевірки циклу випробувань, не повинна перевищувати 0,2 с. Рекомендується, щоб вимірний час для циклу випробувань, плюс або мінус похибка вимірювання ( $k = 2$ ) калібрувальних вимірювань, не перевищував часові межі, зазначені в ISO 6508-1:2015.

Для випробувальних машин, які вимагають від користувача ручного керування циклом випробувань, випробувальна машина повинна бути перевірена на здатність досягти визначеного циклу випробувань.

Калібрування та перевірка гістерезису машини

Машина повинна бути перевірена, щоб переконатися, що на показання не впливає гістерезійний вигин компонентів випробувальної машини (наприклад, рами, тримача зразка тощо) під час випробування. Вплив будь-якої гістерезисної поведінки слід перевіряти шляхом проведення повторних випробувань на твердість за допомогою сферичного індентора діаметром не менше 10 мм, що спирається безпосередньо на тримач зразка або через прокладку таким чином, щоб не відбувалося постійної деформації. Замість тупого індентора можна використовувати паралельний блок, розміщений між тримачем індентора та тримачем зразка. Матеріал тупого індентора і прокладки або паралельного блоку повинен мати твердість не менше 60 HRC.

Виконувати повторні тести Роквелла, використовуючи налаштування, визначені вище. Випробування повинні проводитися за шкалою Роквелла з найбільшою випробувальною силою, яка використовується під час звичайного тестування. Повторіть процедуру перевірки гістерезису максимум для 10 вимірювань і усередніть останні три тести.

Середнє значення останніх трьох випробувань вказує на число твердості  $(130 + 1,0)$  одиниць Роквелла, коли використовуються звичайні кулькові шкали Роквелла В, Е, F, G, Н і К, або в межах  $(100 \pm 1,0)$  одиниць Роквелла, коли використовується будь-яка інша шкала Роквелла.

### **3.3 Непряма перевірка випробувальної машини**

Непряма повірка передбачає калібрування та повірку випробувальної машини шляхом проведення випробувань на еталонних блоках.

Непряму перевірку слід проводити при температурі  $(23 \pm 5)$  °С за допомогою контрольних блоків, відкаліброваних відповідно до ISO 6508-3:2015. Якщо перевірка проводиться за межами цього температурного діапазону, про це повідомляється в протоколі перевірки.

Порядок дій

Для непрямої перевірки випробувальної машини повинні застосовуватися наступні процедури.

Випробувальна машина повинна бути перевірена для кожної ваги, для якої вона буде використовуватися. Для кожної шкали, що підлягає перевірці, повинні використовуватися еталонні блоки з кожного з діапазонів твердості, наведених в таблиці 1. Значення твердості блоків повинні бути обрані так, щоб наблизитися до меж передбачуваного використання. Рекомендується виконувати той самий цикл випробувань, який використовувався під час калібрування еталонних блоків.

Для випробувань слід використовувати лише відкалібровані поверхні випробувальних блоків.

На кожному еталонному блоці мінімум п'ять заглиблень, виконаних відповідно до ISO 6508-1:2015, повинні бути рівномірно розподілені по випробувальній поверхні, а кожне число твердості дотримується з точністю до 0,2 HR від одиниці шкали. Перед виконанням цих заглиблень необхідно зробити принаймні два попередні заглиблення, щоб переконатися, що машина працює вільно і що контрольний блок, індентор і тримач зразка сидять правильно. Результати цих попередніх відступів ігноруються.

#### Повторюваність

Для кожного блоку відліку нехай  $H_1, H_2, H_3, H_4, \dots, H_n$  - значення вимірюваної твердості, розташовані в порядку зростання.

Діапазон повторюваності,  $r$ , випробувальної машини в одиницях Роквелла, при конкретних умовах перевірки, визначається формулою (3.1):

$$r = H_n - H_1 \quad (3.1)$$

Діапазон повторюваності випробувальної машини, що перевіряється, вважається задовільним, якщо він задовольняє умовам, наведеним в стандарті.

Допустима повторюваність представлена графічно на малюнках А.1 і А.2 стандарту.

#### Невизначеність вимірювання

Метод визначення невизначеності результатів калібрування машин для випробування твердості наведено в додатку Б.

#### 3.4 Калібрування та перевірка інденторів твердості Роквелла

Калібрування та повірки інденторів повинні проводитися при температурі  $(23 \pm 5)$  °С. Якщо перевірка проводиться за межами цього температурного діапазону, про це повідомляється в протоколі перевірки.

Для перевірки надійної роботи сфероконічного алмазного індентора відповідно до цієї частини ISO 6508 необхідно провести пряме та непряме калібрування та перевірку кожного індентора.

#### **3.4 Пряме калібрування та повірка алмазного індентора**

Поверхні алмазного конуса і сферичного наконечника повинні бути відшліфовані на глибину проникнення 0,3 мм і змішуватися гладким тангенціальним способом. Обидві поверхні не повинні мати поверхневих дефектів.

Перевірка форми індентора може проводитися прямим вимірюванням або оптичним способом. Перевірка повинна проводитися не менше ніж на чотирьох унікальних однаково розташованих осьових площинах (наприклад, на  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ). Також допустимо вимірювання коліматорним приладом. У цьому випадку вимірювання слід проводити принаймні в чотирьох центральних кутах і включати центральний кут  $120^\circ$ .

Місце злиття сферичного наконечника і конуса алмазу буде змінюватися в залежності від значень радіуса вершини і кута конуса. В ідеалі для ідеальної геометрії індентора точка змішування розташована на відстані 100 мкм від осі індентора, вимірюваної вздовж лінії, нормальної до осі індентора. Щоб уникнути

включення області змішування при вимірюванні радіуса наконечника і кута конуса, частина поверхні алмазу між 80 і 120 вечора може бути проігнорована.

Прилади, що використовуються для перевірки форми алмазного індентора, повинні мати наступну максимальну розширену похибку при розрахунку з 95% довірчою імовірністю:

- кут:  $0,1^\circ$ ;
- радіус: 0,005 мм.

Алмазний конус повинен мати включений кут  $(120 \pm 0,35)^\circ$ .

Наконечник індентора повинен бути сферичним. Його середній радіус визначається принаймні за чотирма одиничними значеннями, виміряними в площинах осьового перерізу, визначених у 6.2.2.2. Кожне окреме значення має бути в межах  $(0,2 \pm 0,015)$  мм. Середнє значення має бути в межах  $(0,2 \pm 0,01)$  мм. Місцеві відхилення від істинного радіуса не повинні перевищувати 0,002 мм.

### **3.5 Непряма перевірка алмазних інденторів**

Значення твердості, що видаються випробувальною машиною, залежать не тільки від розмірів радіуса вістря і кута конуса, але і від шорсткості поверхні і положення кристалографічних осей алмазу, посадки алмазу в його тримач. Щоб дослідити ці впливи, необхідно провести непряму перевірку продуктивності алмазного індентора шляхом проведення серії випробувань на еталонних блоках, які відповідають вимогам ISO 6508-3:2015, і порівняння результатів з калібрувальним алмазним індентором, який відповідає вимогам ISO 6508-3:2015, 4.3.

Ця непряма перевірка повинна виконуватися за допомогою калібрувальної машини, яка відповідає відповідним параграфам ISO 6508-3:2015, пункт 4, відповідно до процедури, описаної в ISO 6508-3:2015, пункт 5.

Алмазні індентори можуть бути сертифіковані для використання для будь-якого

- тільки звичайні алмазні шкали Роквелла, або
- тільки поверхневі алмазні лусочки Роквелла, або
- як звичайні, так і поверхневі алмазні луски Роквелла, або
- будь-яка одинична або обмежена комбінація алмазних лусочок.

Примітка. Може знадобитися використовувати алмазний індентор на зменшеній кількості випробувальних шкал через обмеження сили, наприклад, алмазний індентор з бічним зрізом для перевірки профілів зубів шестерень, або з інших міркувань.

Еталонні блоки, що використовуються для цієї непрямой перевірки, повинні бути обрані на рівнях твердості, Іза якими має бути сертифікований індентор. При перевірці алмазних інденторів, які будуть використовуватися на обмеженій кількості шкал, використовуйте еталонні блоки, визначені в таблиці 5 для шкали HRC та/або відповідні рядки шкали в таблиці 7 для будь-якої іншої алмазної шкали.

Примітка. Альтернативні рівні твердості, наведені в таблиці 4, наведені для використання інденторів, відкаліброваних за іншими міжнародними стандартами.

Випробування повинні проводитися відповідно до ISO 6508-1:2015 за наступною процедурою.

Для кожного блоку середнє значення твердості трьох заглиблень, виконаних за допомогою індентора, що перевіряється, не повинно відрізнятися від середнього значення твердості трьох заглиблень, отриманих за допомогою калібрувального індентора, більш ніж на  $\pm 0,8$  одиниць Роквелла. Поглиблення, зроблені за допомогою індентора, що перевіряється, і за допомогою калібрувального індентора, повинні примикати один до одного на кожному блоці.

### 3.6 Кульковий індентор

Кулькові індентори зазвичай складаються зі сферичної кульки та окремого відповідним чином сконструйованого тримача. Допускаються цільні індентори зі сферичними наконечниками за умови, що поверхня індентора, яка контактує з випробувальним зразком, відповідає вимогам розміру, форми, обробки та твердості і він відповідає вимогам до продуктивності.

Пряме калібрування та перевірка кульового індентора

Кульки повинні бути відполіровані і не мати поверхневих дефектів.

Користувач повинен або виміряти м'ячі, щоб переконатися, що вони відповідають наступним вимогам, або отримати м'ячі від постачальника, який засвідчує дотримання наступних умов. З метою перевірки розміру, щільності та твердості кульок слід випробувати принаймні одну кульку, вибрану випадковим чином із партії. Кульки, перевірені на твердість, слід викинути.

Діаметр, виміряний не менше ніж у трьох положеннях, не повинен відрізнятись від номінального діаметра більш ніж на допуск.

Характеристики композитних кульок з карбіду вольфраму повинні бути наступними:

Твердість: твердість повинна бути не менше 1 500 HV при визначенні з використанням випробувальної сили не менше 4,903 Н (HV 0,5) відповідно до ISO 6507-1. Кульку можна випробувати безпосередньо на цій сферичній поверхні або шляхом секціонування кульки та тестування на внутрішній частині кульки.

Твердість сталевих куль повинна бути не менше 750 HV, якщо вона визначається за допомогою випробувального зусилля 98,07 Н відповідно до ISO 6507-1 (див. таблицю 9).

Примітка. Кульки із загартованої сталі використовуються лише під час проведення випробувань на тонкому листовому металі відповідно до ISO 6508-1:2015 Додаток А.



### **3.7 Інтервали між прямим і непрямим калібруванням і повіркою**

Графіки безпосередньої повірки машин Роквелла на твердість наведені в стандарті.

Непряма перевірка проводиться не рідше одного разу на 12 місяців і після проведення прямої перевірки. Для машин з інтенсивним використанням може бути доречним менший інтервал.

Якщо непряма перевірка не була проведена протягом 13 місяців, перед використанням тестера повинна бути проведена пряма перевірка.

Крім того, рекомендується безпосередньо перевіряти алмазний індентор після двох років використання.

Пряма перевірка цих параметрів може здійснюватися послідовно (до тих пір, поки машина не пройде непряму перевірку) і не є обов'язковим, якщо можна продемонструвати (наприклад, за допомогою тестів з еталонним індентором), що індентор був причиною несправності.

Як мінімум, перевірте тривалість сумарних випробувальних сил.

### **3.8 Звіт про перевірку**

Звіт про перевірку необхідний для прямої та непрямої перевірки випробувальних машин та інденторів. Акт звіту про перевірку повинен містити як мінімум наступну інформацію:

- посилання на стандарт ISO 6508-2.
- метод перевірки (прямий та/або непрямий);
- ідентифікаційні дані для машини для випробування твердості або індентора/тримача кульки;
- засоби верифікації (опорні блоки, пружні доказові пристрої тощо);
- перевірено шкалу твердості за шкалою Роквелла;
- у звітах індентора за діамантовою шкалою зазначаються шкали (шкали), для виконання яких сертифікований індентор;

- температуру повірки, якщо повірка проводилася поза  $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ ;
- отриманий результат;
- дата перевірки та посилання на установу верифікації;
- невизначеність результату перевірки.

### **3.9 Висновок**

Проведено дослідження вимог міжнародних та національних нормативних документів щодо методів перевірки випробувальних машин (прямі та непрямі) для визначення твердості за Роквеллом відповідно до стандарту ISO 6508-1, а також метод перевірки інденторів твердості Роквелла.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМИ ТА МЕТОДИКИ ПІДТВЕРДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МІР ТВЕРДОСТІ КОНТРОЛЬНИХ

#### 4.1 Загальні положення

Ця програма та методика метрологічної атестації (далі за текстом □ методика) розроблена відповідно до вимог ДСТУ 3215 «Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення» та поширюється на міри твердості контрольні (далі за текстом □ міри) і встановлює зміст та методику їх державної метрологічної атестації (далі за текстом – атестація).

Міри призначені для контролю правильності результатів вимірювання твердомірів.

Міри повинні використовуватися у комплектності та відповідно до вимог паспорту.

#### 4.2 Розгляд технічної документації

4.2.1 При розгляді технічної документації повинна проводитись:

- перевірка відповідності комплектності представленої технічної документації вимогам ДСТУ 3215;
- перевірка відповідності технічних характеристик мір, зазначених у паспорті;
- перевірка відповідності технічних характеристик мір вимогам державних стандартів та інших нормативних документів, що поширюються на неї;
- перевірка правильності вибору способу вираження метрологічних характеристик мір, нормованих у технічній документації, та їх відповідності вимогам стандартів державної метрологічної системи;

- перевірка правильності вибору методів контролювання технічних характеристик мір;
- перевірка правильності вибору методів контролювання забезпечення вимог безпеки життєдіяльності людини;
- оцінка метрологічного забезпечення мір при експлуатації.

### 4.3 Експериментальні дослідження

4.3.1 При атестації мір повинні бути виконані операції, зазначені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Назва операції	Номер пункту методики
1 Зовнішній огляд:	
1.1 Зовнішній вигляд мір	7.1.1
1.2 Маркування мір	7.1.2
2 Визначення основних характеристик мір	7.2
2.1 Визначення величини твердості мір.	7.2.1
2.2 Визначення розмаху значень твердості мір	7.2.2

4.2.2 При негативних результатах будь-якої операції атестацію мір припиняють. Міри піддають ремонту з проведенням повторної атестації.

### 4.4 Засоби атестації

4.1 При проведенні атестації мір повинні бути застосовані засоби вимірювальної техніки та допоміжне обладнання, зазначені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Назва засобів атестації	Основні технічні характеристики	Номер пункту методики
Гігрометр психрометричний ВИТ-1 ТУ У 14307481.001-92	Діапазон вимірювання відносної вологості від 20 % до 90 %, Границі абсолютної похибки $\pm 6$ %. Діапазон вимірювання температури від 0 °С до 25 °С, ціна поділки 0,2 °С	4.1
Набір мір ДСТУ ГОСТ 9031:2009	Фактичні значення твердості мір - згідно свідоцтва про повірку.	6.2

Назва засобів атестації	Основні технічні характеристики	Номер пункту методики
	2-й розряд за ДСТУ 3869-99 та ДСТУ 3879-99	
Твердомір-компаратор ГОСТ 23677-79	Діапазон вимірювання від 8 до 450 HRB. Границі відносної похибки $\pm 1,0\%$ Діапазон вимірювання від 20 до 67 HRC. Границі абсолютної похибки $\pm 0,5$ HRC Діапазон вимірювання від 8 до 2000 HV Границі відносної похибки $\pm 1,0 \%$	6.2
Штангенциркуль ШЦ-I ГОСТ 166-89	Діапазон вимірювання від 0 до 125 мм. Ціна поділки 0,1 мм.	

4.4.2 Допускається застосування інших засобів атестації з характеристиками не гіршими, ніж у наведених вище.

#### 4.5 Умови проведення атестації

4.5.1 Атестація проводиться за умов:

- температура навколишнього середовища  $(293 \pm 10)$  К  $((20 \pm 10) ^\circ\text{C})$ ;
- відносна вологість навколишнього повітря від 20 % до 80 %;

#### 4.6 Підготовка до атестації

4.6.1 Перед проведенням атестації необхідно перевірити наявність чинних свідоцтв про метрологічну атестацію/півірку (або відбитків півірочних тавр) на засоби вимірювальної техніки, що застосовують при атестації.

4.6.2 Засоби атестації повинні бути підготовлені до роботи згідно до вимог експлуатаційних документів (далі – ЕД), які на них поширюються.

4.6.3 Перед проведенням атестації міри повинні бути встановлені на робоче місце та підготовлені до вимірювань згідно вимог паспорту.

4.6.4 При проведенні атестації обслуговуючий персонал повинен дотримуватись загальних вимог безпеки.

## 4.7 Методика досліджень

### 4.7.1 Зовнішній огляд

4.7.1.1 При зовнішньому огляді перевіряють відповідність мір таким вимогам: відсутність видимих пошкоджень та корозії на робочих поверхнях;

4.7.1.2 При перевірці маркування мір контролюють:

- наявність маркування номінального значення твердості на мірах;
- наявність ідентифікаційного номеру мір;
- наявність відбитка тавра первинної повірки.

### 4.7.2 Визначення основних характеристик мір

#### 4.7.2.1 Визначення величини твердості мір

Перед початком вимірювань проводять визначення поправки до показів твердоміра-компаратора за допомогою еталонних мір твердості 2-го розряду відповідного значення. Проводять два послідовних вимірювання твердості відповідно до вимог ЕД на твердомір. За результат беруть значення, отримане при другому вимірюванні. Між вимірюваннями еталонну міру переміщують по столику твердоміра не відриваючи її від поверхні столика. Розраховують поправку до показів твердоміра  $\Delta H$  за формулою

$$\Delta H = H_{тк} - H_{ме}, \quad (4.1)$$

де  $H_{тк}$  – покази твердоміра-компаратора;

$H_{ме}$  – значення твердості еталонної міри.

Встановлюють на столик твердоміра міру, що атестується та проводять вимірювання твердості. Перше вимірювання вважається пробним і його результат не береться до уваги. Після пробного вимірювання проводять п'ять вимірювань твердості: одне в центрі міри і чотири по кутах. Між вимірюваннями міру переміщують по столику твердоміра не відриваючи її від поверхні столика. Вибір місця проведення вимірювання на робочій поверхні міри має відповідати вимогам ГОСТ 9012, ГОСТ 9013 та ГОСТ 2999.

Твердість міри Нм визначають за формулою:

$$H_m = H_{mm} + \Delta H, \quad (4.2)$$

де  $H_{mm}$  – значення медіани з п'яти одержаних значень твердості міри;

$\Delta H$  – поправка до показів твердоміра, визначена за формулою 1.

Значення твердості мір має відповідати вимогам ГОСТ 9031.

4.7.2.2 Визначення величини розмаху твердості мір.

Розмах значень твердості мір  $b_H$  визначають за формулою:

$$b_H = H_{\max} - H_{\min}, \quad (4.3)$$

де  $H_{\max}$  – максимальне значення твердості міри з п'яти показів;

$H_{\min}$  – мінімальне значення твердості міри з п'яти показів.

Розмах значень твердості мір має відповідати вимогам ГОСТ 9031.

## 4.8 Оформлення результатів атестації

4.8.1 Результати атестації мір оформляються протоколом

(додаток А).

4.8.2 При позитивних результатах атестації оформляється свідоцтво (додаток Б).

## 4.9 Періодична повірка

4.9.1 Повірку мір проводять згідно цієї методики за винятком розділу 1.

4.9.2 Періодичність повірки мір встановлюється відповідно до вимог чинних нормативних документів або законодавчих актів. За їх відсутності – власником виробів, але не більше ніж 2 роки.

#### **4.10 Висновок**

Розроблено програми та методики метрологічної атестації на міри твердості контрольні.



## ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень сучасного стану та перспектив розвитку методів вимірювання твердості матеріалів встановлено.

1. Твердість є складним параметром, пов'язаним з «первинними» характеристиками матеріалів, але залежить від методу, за допомогою якого виконуються випробування. На «повсякденному» рівні значення твердості визначається шляхом взаємного порівняння різних матеріалів.

2. Перехід від якісних (відносних) випробувань на твердість до вимірювань твердості відбувається зі стандартизацією шкали твердості, що має на увазі затвердження методики вимірювань, конструкції вимірювальної апаратури, вимог до умов випробувань, способів вираження чисел, в яких вимірюється твердість, засобів і методів перенесення чисел твердості (забезпечення простежуваності).

3. Шкали твердості є шкалами порядку, тому результати, отримані в результаті вимірювань, піддаються тільки операціям порівняння і виражаються в безрозмірних величинах – числах твердості.

4. Стандартизація методів вимірювання твердості має велике практичне значення, що обумовлено широким поширенням портативних динамічних твердомірів, що застосовуються на вітчизняних підприємствах енергетики, транспорту та військово-промислового комплексу.

5. Розробка принципів побудови та оптимізації параметрів дослідного зразка еталонної установки твердості та методики дослідження її метрологічних характеристик, а також технології виготовлення та методів дослідження метрологічних характеристик еталонних мір твердості дозволить реалізувати схему перенесення одиниці твердості за однією шкалою до значень іншої та підвищити достовірність і точність результатів вимірювань за рахунок дотримання вимог стандартів та забезпечення простежуваності до первинної стандарт.

6. Розроблено програми та методики підтвердження метрологічних характеристик на міри твердості контрольні, які представлено в додатку А.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. T.M. Osman, J.J. Lewandowski, and W.H. Hunt, Jr., Fabrication of Particulates Reinforced Metal Composites, ASM International, 1990, p 209
2. Alloy Phase Diagrams, Vol 3, ASM Handbook, ASM International, 1992
3. D. Hull, An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press, 1975
4. R.W.K. Honeycombe, The Plastic Deformation of Metals, 2nd ed., Edward Arnold, London, 1984
5. D. Hull and D.J. Bacon, Introduction to Dislocations, Pergamon Press, London, 1984
6. A.S. Keh, Direct Observations of Imperfections in Crystals, J.B. Newbrick and J.H. Wernick, Ed., Interscience Publishers, New York, 1962, p 213–238
7. A.N. Stroh, Proc. R. Soc. (London), Vol 223, 1954, p 404
8. Z. Shen, R.H. Wagoner, and W.A.T. Clark, Acta Metall., Vol 36, 1988, p 3231
9. T.C. Lee, I.M. Robertson, and H.K. Birnbaum, Metall. Trans. A, Vol 21, 1990, p 2437
10. W.T. Lankford, S.C. Snyder, and J.A. Bauscher, Trans. ASM, Vol 42, 1950, p 1197–1228
11. J.F. Held, Proc. Mechanical Working and Steel Processing Conference, Vol 4, AIME, New York, 1965, p 3
12. W.B. Morrison and W.C. Leslie, Metall. Trans., Vol 4, 1973, p 379
13. N.J. Petch, J. Iron Steel Inst. Jpn., Vol 173, 1953, p 25
14. Fleischer, Acta Metall., Vol 11, 1963, p 203
15. J. Heslop and N.J. Petch, Philos. Mag., Vol 2, 1958, p 649
16. G.T. Hahn, Acta Metall., Vol 10, 1962, p 727
17. W.J. Murphy and R.G.B. Yeo, Met. Prog., Sept 1969, p 85
18. J.W. Martin, Micromechanisms in Particle Hardened Alloys, Cambridge University Press, 1980

19. L.B. Morris et al., Formability of Aluminum Sheet Alloys, Aluminum Transformation Technology and Applications, C.A. Pampillo et al., Ed., American Society for Metals, 1982, p 549
20. V. Kerlins and A. Philips, Modes of Fracture, Fractography, Vol 12, ASM Handbook, ASM International, 1987, p 12–71
20. I. Kirman, Metall. Trans., Vol 2, 1971, p 1761
21. R.H. Van Stone, T.B. Cox, J.R. Low, and J.A. Psioda, Int. Met. Rev., Vol 30, 1985, p 157
22. W.M. Garrison, Jr. and N.R. Moody, J. Phys. Chem. Solids, Vol 48, 1987, p 1035
23. B.I. Edelson and W.M. Baldwin, Trans. ASM, Vol 55, 1962, p 230
24. G.E. Dieter, Mechanical Metallurgy, 3rd ed., McGraw-Hill, 1986
25. ISO 6507-1, Metallic materials — Vickers hardness test — Part 1: Test method
26. ISO 6508-1:2015, Metallic materials — Rockwell hardness test — Part 1: Test method
27. ISO 6508-3:2015, Metallic materials — Rockwell hardness test — Part 3: Calibration of reference blocks
28. Артемьев, Ю.Г. Контактный динамический метод и прибор контроля твердости металлов и сплавов/ Ю.Г. Артемьев // Ж. Заводская лаборатория. 1989. Т55, №12, с.79-83.
29. Батуев, Г. С. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г. С. Батуев [и др.] // Изд. 2-е перераб. М.: Машиностроение, 1977 238 с.
30. Гогоберидзе, Д.Б. Твердость и методика ее измерения / Д.Б. Гогоберидзе // — М.: Машгиз, 1952. — 282 с.
31. ГОСТ 18661-73 Сталь. Измерение твердости методом ударного отпечатка
32. ГОСТ 22761-77 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия.
33. ГОСТ 22762-77 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара.

34. ГОСТ 22975-78 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (по Супер-Роквеллу).
35. ГОСТ 2999-75 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу.
36. ГОСТ 23273-78 Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору).
37. ГОСТ 8.061-80 Государственная система обеспечения единства измерений, Поверочные схемы, содержание и построение.
38. Григорович, В.К. Твердость и микротвердость металлов / В.К. Григорович // Изд-во «Наука», 1976.
39. Давиденков, Н.Н. Динамическая прочность и хрупкость металлов / Н.Н. Давиденков // Избранные труды : В 2-х т. - Киев : Наукова думка, 1981. - Т. 1. 704 с., стр. 424-446.
40. Давиденков, Н.Н. Некоторые проблемы механики материалов / Н.Н. Давиденков // [Л.] : Ленингр. газетно-журн. и кн. изд-во, 1943. – 152 с.
41. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон // М: Мир, 1989. – 510 с., стр. 408-414.
42. Дрозд, М.С., Определение механических свойств металла без разрушения / М.С. Дрозд // М. «Металлургия», 1965, 171 с.
43. ASTM E140-12B(2019)e1 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness. 2019.
44. ASTM E 448-82. Standard Practice for Scleroscope Hardness Testing of Metallic Materials, 2008.
45. Cohen, L. Time-Frequency Analysis / L. Cohen // Prentice Hall PTR (1995) 300.
46. Cordill, M. Effects of dynamic indentation on the mechanical response of materials / M. Cordill, N. Moody, W. Gerberich // Journal of Materials Research, 2008, 23(6), 1604-1613.

47. Formisano, A. Leeb hardness experimental tests on carpentry steels: Surface treatment effect and empirical correlation with strength / A. Formisano.
48. Chiumiento, G. Di Lorenzo // AIP Conf. Proc. 1978, (2018).
49. Gogolinskii, K.V. Mechanical properties measurements with portable hardness testers: advantages, limitations, prospects / K.V. Gogolinskii, V.A. Syasko, A.S. Umanskii, A.A. Nikazov and T.I. Bobkova // 2019 Journal of Physics Conference Series 1384:012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1384/1/012012>.
50. Gorbashova, M. Application of direct optical heterodyning methods for studying the processes of chondrite targets destruction by laser radiation / M. Gorbashova, I. Burdonskiy, K. Gubskiy, A. Kuznetsov, A. Ramazanov, K. Lukyanov, 116
51. A. Leonov, K. Makarov, I. Timofeyev and V. Yufa // J. Phys.: Conf. Ser. 941 (2017) 012002.
52. Herrmann, K. Guidelines for the Evaluation of the Uncertainty of Hardness Measurements / K. Herrmann // MAPAN - Journal of Metrology Society of India, Vol. 20, №1, 2005, pp. 5-13.
53. Herrmann, K. Reference measuring instrument for calibration of Leeb-hardness / K. Herrmann // Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Scientific news from division 5, review of the Annual Report, 2007.

**ДОДАТОК А**  
**ПРОЄКТ НОРМАТИВНОГО ДОКУМЕНТУ**