

**Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу**

Інститут інформаційних технологій
Кафедра метрології та інформаційно-виміральної техніки

Гуран Юрій Андрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.3
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

**Дослідження метрологічних характеристик засобів вимірювання
твердості за методом Ліба**

(назва роботи)

Метрологія та вимірвальна техніка
(назва освітньої програми)

152 – «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»
(шифр і назва спеціальності)

Гуран Ю.А
(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Кононенко Марина Андріївна, к.т.н, доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

О. Є. Середюк
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ, 2024 р.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-виміральної технології

Освітній рівень другий (магістерський)

Спеціальність 152- Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТ

О.Є. Середюк

« » 2024 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Гуран Юрій Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження метрологічних характеристик засобів вимірювання твердості за методом Ліба

керівник роботи Кононенко Марина Андріївна., к.т.н., доц.,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ ” 2024 року №

2. Строк подання студентом роботи
20.01.2024

3. Вихідні дані до роботи δ засобу вимірювання твердості $=\pm 0.1\%$ від 700 до 790 HLD, $\delta=\pm 0.2\%$ від 450 до 700 HLD.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз сучасного стану методів вимірювання твердості

2. Аналіз засобів вимірювань твердості за шкалами Ліба та розробка проекту повірочної схеми для засобів вимірювання твердості за методом Ліба

3. Розробка структури ієрархічної схеми передачі одиниці твердості за шкалою Ліба та метрологічний аналіз параметрів та методів вимірювань для створення прототипу еталонної установки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Узагальнена структурна схема засобів вимірювання твердості за методом Ліба.

2. Схематичне зображення твердоміра методу Ліба.

3. Діаграма ЕРС $E(t)$, наведеної на котушці індуктивності при вимірі твердості.

4. Проект повірочної схеми вимірювання твердості за методом Ліба.

5. Загальна структура забезпечення простежуваності (метрологічного ланцюга) для визначення та поширення шкал твердості Ліба.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Вступ</i>	13.11.2023	
2.	<i><u>Аналіз сучасного стану методів вимірювання твердості</u></i>	23.11.2023	
3.	<i><u>Аналіз засобів вимірювань твердості за шкалами ліба та розробка проекту повірочної схеми для засобів вимірювання твердості за методом Ліба</u></i>	06.12.2023	
4.	<i><u>Розробка структури ієрархічної схеми передачі одиниці твердості за шкалою Ліба та метрологічний аналіз параметрів та методів вимірювань для створення прототипу еталонної установки</u></i>	27.12.2023	
5.	<i>Оформлення магістерської роботи</i>	13.01.2024	

Студент _____
(підпис)

Гуран Ю.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Кононенко М.А.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

В магістерській роботі на тему «Дослідження метрологічних характеристик засобів вимірювання твердості за методом Ліба»: 79 с., 28 рис., 4 табл., 20 джерела., 5 аркушів креслень.

Об'єкт дослідження – є система метрологічного забезпечення засобів вимірювання твердості за шкалами Ліба.

Мета досліджень. Підвищення точності та достовірності результатів контролю механічних властивостей портативними динамічними твердомірами шляхом створення метрологічного забезпечення вимірювань твердості за методом Ліба

Методи дослідження. Теоретичні дослідження побудовані на основі положень фізики міцності та пластичності, а також механіки твердого тіла, що деформується. Виходячи з цих досліджень проведена оцінка вкладу параметрів, що заважають, в похибку результатів вимірювань.

Ключові слова: твердоміри, методи визначення твердості матеріалів, засоби вимірювання твердості.

ABSTRACT

In the master's thesis on "Investigation of metrological characteristics of hardness measuring instruments by the Lieb method": 79 p., 28 figures, 4 tables, 20 sources, 5 sheets of drawings.

The object of research is the system of metrological support of hardness measuring instruments using the Libb scales.

Purpose of the study. to increase the accuracy and reliability of the results of mechanical properties control by portable dynamic hardness testers by creating metrological support for hardness measurements by the Lieb method.

Research methods. Theoretical studies are based on the provisions of the physics of strength and plasticity, as well as the mechanics of a deformable solid. On the basis of these studies, the contribution of interfering parameters to the error of measurement results is estimated.

Key words: hardness testers, methods for determining the hardness of materials, hardness measuring instruments.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1. Аналіз сучасного стану методів вимірювання твердості.....	11
1.1. Твердість як конструктивна властивість матеріалів.....	11
1.1.1. Фізичні та методичні основи методів вимірювання твердості... ..	13
1.1.2. Аналіз впливу параметрів на результат вимірювання.....	16
1.2. Визначення твердості за методом Брінелля.....	18
1.2.1. Переваги і недоліки методу Брінелля.....	22
1.3 Визначення твердості за Роквеллом.....	23
1.3.1 Переваги та недоліку методу Роквелла.....	28
1.4 Визначення твердості за Віккерсом.....	29
1.4.1 Переваги та недоліки методу Віккерса.....	33
1.5 Визначення твердості за Шором.....	34
1.5.1 Переваги та недоліки методу Шора.....	36
1.6 Висновки за розділом 1.....	37
2. Аналіз засобів вимірювань твердості за шкалами ліба та розробка проекту повірочної схеми для засобів вимірювання твердості за методом Ліба.....	38
2.1. Дослідження методу вимірювання твердості методом Ліба.....	38
2.1.1 Аналіз апаратної реалізації засобів динамічних методів виміру твердості та їх метрологічного забезпечення.....	39
2.1.2 Аналіз процесу взаємодії ударника з випробуваним зразком при вимірювання твердості методом пружної віддачі.....	44
2.1.3 Теоретичний аналіз залежності коефіцієнта відновлення від параметрів твердоміра та механічних властивостей випробуваного зразка....	48
2.2. Державний первинний еталон одиниць твердості за шкалами Брінелля та Віккерса.....	52
2.2.1 Комплекс засобів вимірювальної техніки з якого складається державний первинний еталон вимірювань твердості за шкалами Брінелля та Віккерса та метрологічні характеристики приладів.....	52
2.2.2 Робочі еталони 1-го та 2-го розряду твердості за шкалами Брінелля та Віккерса.....	54
2.3 Національний (державний первинний) еталон одиниць твердості за шкалами Роквелла та Супер-Роквелла.....	56
2.3.1 Комплекс засобів вимірювальної техніки з якого складається державний первинний еталон вимірювань твердості за шкалами Роквелла і Супер-Роквелла та метрологічні характеристики ЗВТ.....	56
2.3.2 Робочі еталони 1-го та 2-го розряду твердості за шкалами Роквелла і Супер-Роквелла.....	58
2.4. Первинний еталон шкал твердості Ліба.....	60
2.5 Проект повірочної схеми вимірювання твердості за методом Ліба.....	62
2.6 Висновки за розділом 2.....	64

3. Розробка структури ієрархічної схеми передачі одиниці твердості за шкалою ліба. Метрологічний аналіз параметрів та методів вимірювань для створення прототипу еталонної установки.....	65
3.1. Встановлення вимог з метою забезпечення єдності вимірів твердості за методом Ліба.....	65
3.2. Характеристики еталонних мір твердості.....	67
3.2.1. Вимоги до максимального коефіцієнта варіації для мір твердості 1-го розряду.....	67
3.2.2. Вимоги до еталонних установок 2-го розряду при повірці по еталонним мірам твердості 1-го розряду.....	68
3.2.3. Вимоги до робочих засобів вимірювань.....	
3.3. Метрологічний аналіз методів вимірювань для створення прототипу еталонної установки.....	71
3.3.1 Аналіз ударного перетворювача з пружинним механізмом розгону ударника.....	71
3.3.2. Оцінка впливу висоти скидання.....	72
3.3.3. Оцінка впливу кута нахилу.....	73
3.3.4. Оцінка впливу прискорення вільного падіння.....	73
3.3.5. Аналіз методів вимірювання швидкості ударника.....	74
3.4 Висновки за розділом 4	76
Висновки.....	77
Список використаних джерел.....	78

ВСТУП

Твердість – одна з найважливіших механічних характеристик матеріалів. Її виміри широко поширені в промисловості при контролі технологічних процесів, визначенні експлуатаційних характеристик виробів, виборі режимів механічної обробки та типу різального інструменту.

Дослідження на твердість завжди проводяться безпосередньо на поверхні виробу або деталі шляхом механічного вдавлювання в метал іншого більш твердого тіла (індентора). Вимірювання твердості, як способу дослідження механічних властивостей металів, в результаті простоти і швидкості визначення твердості, отримав дуже широке застосування, як на заводах так і в науково-дослідних закладах.

Існуючі в даний момент методи вимірювання твердості були розроблені та введені у користування у ХХ столітті, при цьому методики вимірювань залишаються незмінними, модернізується лише випробувальне обладнання. Завдяки появі та розвитку нових обчислювальних технологій і техніки на ринку стали поширюватися нові портативні методи вимірювання твердості, що дозволяють здійснювати оперативний безконтактний контроль характеристик виробів складної форми, а також проводити вимірювання у важкодоступних місцях.

Найбільш поширеним портативним динамічним методом вимірювання твердості є метод за шкалами Ліба.

На сьогоднішній день в Україні здійснюють градування приладів на окремих матеріалах та об'єктах, які потрібно вимірювати в межах однієї організації. Даний спосіб не можна вважати оптимальним або хоча б прийнятним, так як достовірні результати можуть бути отримані лише за допомогою конкретних моделей приладів на певних об'єктах, для яких були зроблені зразки.

Більш перспективним варіантом вирішення цієї проблеми є стандартизація даного методу, що дозволить без ризику застосовувати різні моделі твердомірів (задовольняють вимогам стандарту) з отриманням однакових результатів для всіх класів матеріалів, а також перераховувати значення твердості нової шкали в загальноприйнятій за допомогою затверджених таблиць.

Поширення твердомірів за методом Ліба робить завдання створення метрологічного забезпечення цих приладів вкрай своєчасним і актуальним. Забезпечення простежуваності результатів вимірювань неможливе без розробки ієрархічної схеми передачі одиниці твердості за шкалою Ліба (перевірочної схеми) та її ключових елементів – еталонних установок та заходів твердості за шкалами Ліба.

Мета роботи полягає у підвищенні точності та достовірності результатів контролю механічних властивостей портативними динамічними твердомірами шляхом створення метрологічного забезпечення вимірювань твердості за методом Ліба.

Предметом дослідження є система метрологічного забезпечення засобів вимірювання твердості за шкалами Ліба, науково-технічні та методичні аспекти реалізації еталонних установок та заходів твердості, а також методик їх калібрування для забезпечення єдності вимірювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні завдання:

1. Провести аналіз та дослідження методів та засобів вимірювань твердості металів, а також існуючих варіантів методів вимірювання та практичної реалізації портативних пристроїв для вимірювання твердості.

2. Розробити модель процесу вимірювання твердості за методом Ліба, що враховує впливові величини.

3. Розробити структуру ієрархічної схеми передачі одиниці твердості за шкалами Ліба (проект перевіркової схеми), що забезпечує простежуваність результатів вимірювань твердості до первинного зразка.

4. Проект повіркової схеми вимірювання твердості за методом Ліба.

Наукова новизна: вперше розроблено модель процесу вимірювання твердості за методом Ліба, що враховує вплив фізичних властивостей та геометричних параметрів вимірювального перетворювача та випробуваного зразка на результати вимірів. Запропоновано та обґрунтовано 4-х ступінчасту структуру ієрархічної схеми передачі одиниці твердості за шкалами Ліба (проект перевіркової схеми), заснована на спільному використанні поелементної атестації та калібрування за мірами твердості робочих еталонних установок та засобів вимірювання

Методи дослідження: теоретичні дослідження побудовані на основі положень фізики міцності та пластичності, а також механіки твердого тіла, що деформується. Виходячи з цих досліджень проведена оцінка вкладу параметрів, що заважають, в похибку результатів вимірювань. Основні параметри розробленого прототипу еталонної установки ґрунтуються на теоретичному аналізі, розрахунках та вимогах нормативно-технічної документації.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є система метрологічного забезпечення засобів вимірювання твердості за шкалами Ліба.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ

1.1 Твердість як конструктивна властивість матеріалів

Механічні властивості матеріалів – реакція матеріалу на прикладені механічні навантаження. Під впливом докладеної сили тіло змінює свою форму, тобто, деформується. При деформаціях твердого тіла його частинки (атоми, молекули, іони), що знаходяться у вузлах кристалічних ґрат, зміщуються зі своїх положень рівноваги. Цьому зміщенню протидіють сили взаємодії між частинками твердого тіла, що утримують ці частинки на певній відстані один від одного. Тому за будь-якого виду деформації в тілі виникають внутрішні сили, що перешкоджають його деформації. З погляду механічних властивостей виріб характеризується значенням деформації, що створюється у відповідь на прикладену силу, а матеріал – відносною деформацією на одиницю довжини під впливом питомої сили на одиницю площі, званої напругою. Відносна деформація - безрозмірна величина, що визначається як відношення подовження (стиснення) до вихідного розміру зразка. Напруга - це сила, прикладена до одиниці площі перерізу зразка матеріалу чи виробу. У СІ за одиницю механічної напруги приймають $1\text{Па} = 1\text{Н/м}^2$. Основною характеристикою механічних властивостей матеріалу є співвідношення між напругою та деформацією (рис. 1.1). Деформації прийнято розділяти на пружні, якщо після припинення дії сили, форма та об'єм тіла повністю відновлюються, залишкову, які поступово розвиваються і не зникають після припинення дії сили. Розрізняють основні типи деформації: розтягування та стискування (одностороннього та всебічного), вигину, кручення та зсуву. Якщо в процесі деформування тіла відбувається перевищення граничного значення

напруги, званого межею міцності, відбувається руйнація зразка. Залежно від ступеня пластичної деформації перед руйнуванням розрізняють два основні види руйнувань: крихке та в'язке. При в'язкому руйнуванні матеріал зазнає перед руйнуванням як пружну, так і значну пластичну деформацію. За відсутності пластичної деформації або її незначному розвитку відбувається крихке руйнування.



Рисунок 1.1 – Типова крива залежності деформації розтягу від напруження.

Твердість є однією з основних характеристик матеріалів і є узагальненою характеристикою пружно-пластичних властивостей матеріалів. Вимірювання твердості широко поширені в промисловості як при виборі технології та режимів обробки матеріалів, так і для оцінки технічного стану виробів при їх виготовленні та подальшій експлуатації. Твердість найчастіше визначають, як здатність матеріалу чинити опір вдавлюванню до нього твердішого тіла (індентора). При вдавненню індентора в випробуваний матеріал у при поверхневій області виникають механічні напруги, які залежать від прикладеного зусилля, форми

індентора та параметрів циклу навантаження. Залежно від величини цих напруг у поверхневому шарі металу відбуваються пружні, пружно-пластичні або пластичні деформації. За величиною цих деформації на поверхні випробуваного зразка визначають значення твердості.

1.1.1 Фізичні та методичні основи методів вимірювання твердості

Твердість – комплексний параметр, зв'язаний з «первинними» характеристиками матеріалів, але залежить від методу, за допомогою якого проводять випробування. На «побутовому» рівні величина твердості визначається через взаємне порівняння різних матеріалів. Перехід від якісних (відносних) випробувань на твердість до вимірювань значень твердості відбувається при стандартизації шкали твердості, яка має на увазі затвердження методики вимірювань, конструкції вимірювального обладнання, вимог до умов випробувань, способів вираження чисел, в яких вимірюється твердість, засобів та методів передачі чисел твердості. Шкали твердості є шкалами порядку, тому результати отримані після вимірювань опрацьовуються тільки операціям порівняння і виражаються в безрозмірних величинах – числах твердості.

Методи вимірювання твердості можна класифікувати наступним образом

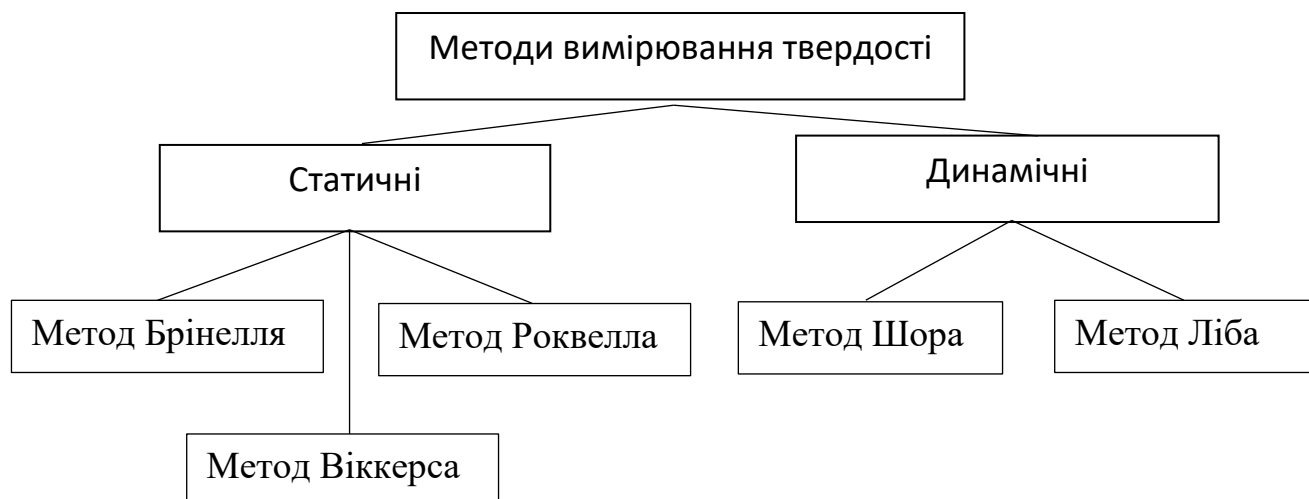


Рисунок 1.2 – Класифікація методів вимірювання твердості

Статична твердість характеризується швидкістю вдавлювання індентора. Значення твердості визначається шляхом прямого вимірювання геометричних розмірів відпечатків (шкал Брінелля, Віккерса) або по глибині вдавненого індентора (шкала Роквелла). Значення твердості (число твердості) визначається по співвідношенні прикладеної сили і геометричних розмірів відпечатка.

Маєр показав, що при статичному вдавлюванні шаріка між P – силою вдавлювання і діаметром відпечатка d існує залежність :

$$P = ad^n, \quad (1.1)$$

де, a та n – дві константи, характеризуючі матеріал : a залежить від діаметра шаріка, n навпаки, не залежить, але відрізняється для одного і того самого матеріалу разом і разом з наклепом; зазвичай n сягає між 2 та 2,5.

Фізичний зміст статичної твердості: опір матеріалу пластичної деформації при повільному (квазістатичному) впровадженні твердішого індентора. Статична твердість як вторинна характеристика матеріалу є функцією (2) наступних первинних характеристик матеріалу: границя плинності, границя міцності, коефіцієнта деформаційного зміцнення :

$$H = f(\sigma_T, \sigma_B, n), \quad (1.2)$$

де, σ_T – межа текучості, σ_B – межа міцності (тимчасового спротиву), n - показник деформаційного зміцнення з рівняння Мейєра (1)

Вплив модуля пружності на величину виміряних значень твердості вважається дуже малим для таких пластичних матеріалів, як метали, при значних ступенях деформування, які мають місце для більшості методів вимірювання твердості.

Різні статичні шкали твердості розрізняються формою індентора, діапазоном навантаження, способом вираження чисел твердості в

залежності від вимірюваних величин. Відмінність геометрії індентора призводить до різного ступеня деформування і, як наслідок, деформаційного зміцнення матеріалу, що особливо характерно для металів, що мають великий рівень деформаційного зміцнення. Тому при позначенні вимірних значень твердості обов'язково вказують найменування шкали та прикладене навантаження. Всі ці відмінності шкал твердості призводять до того, що не існує універсальних для всіх матеріалів способів перерахунку одних шкал статичної твердості в інші. Фізично це означає, що різні матеріали по – різному перешкоджають пластичній деформації при впровадженні інденторів з різною геометрією та на різну глибину.

Динамічні способи вимірювання твердості можуть бути розділені на три основні групи:

- а) *метод відбитка*, що дається кулькою (або ударником з кулькою на кінці) на поверхні зразка при ударі замість статичного натискання;
- б) *метод пружної віддачі* при ударі по випробуваному об'єкту сталевого кульки або спеціального бойка;
- в) *метод гойдання* сталеві або алмазної кульки, з'єднаної з певною масою (маятник), у гнізді зробленого ним відбитка.

В даний час методи гойдання маятника слабо поширені в промисловості, тому надалі аналізуватимемо методи відбитка та метод пружної віддачі.

Метод відбитка дуже близький до статичних методів. Твердість характеризується величиною відновленого відбитка, що дається стандартним ударником у матеріалі, є перехідними від статичних методів вимірювання твердості до суто динамічних. Результати вимірювань, отримані даними динамічними методами, аналогічні статичним. Твердість у цих методах пропорційна величині пластичної деформації, тому

найменша зміна швидкості удару призводить до суттєвої похибки результатів вимірів.

Метод пружної віддачі. Існує особлива група методів визначення динамічної твердості (методи Шора, Ліба та ін), де єдиним параметром, що вимірюється, є висота або швидкість відскоку ударника, забезпеченого жорстким сферичним наконечником (індентором). За міру твердості тут приймається висота відскоку чи швидкість відскоку умовних одиницях.

При зіткненні двох тіл відбувається деформація області контакту індентора з поверхнею, що веде до утворення залишкового відбитка. На пластичну деформацію витрачається частина енергії удару, енергія, що залишилася, витрачається на пружну деформацію, повертається до ударника і піднімає його на висоту H_2 . Оскільки висота падіння H_1 та маса m ударника постійні, то висота відскоку H_2 характеризує енергію пружної після дії чи відновлення відбитка. Якщо виразити пружну твердість в одиницях висоти відскоку чи умовних одиницях довжини, що у прихованій формі укладає розмірність потенційної енергії (H^*mm), то порівнювати її з динамічною чи статичною твердістю буде важко. У методі Шора пружна твердість виражена у вигляді відношення H_2/H_1 .

1.1.2 Аналіз впливу параметрів на результат вимірювання.

Твердість матеріалу залежить від безлічі чинників: складу і структури матеріалу, методу вимірювання (навантаження, що прикладається, швидкості навантаження, форми індентора) і не є однозначно визначуваною величиною.

Впровадження індентора у випробовуваний об'єкт сприяє появі деформації ε в ділянці контакту індентора з поверхнею і виникненню напруги σ . Інтеграл напружень за площею відбитка описує силу, що

протидіє впровадженню індентора. При досягненні максимальної глибини впровадження, в процесі витримки під навантаженням, сила опору матеріалу і сила, прикладена до індентора, рівні. Відношення цієї сили до площі проекції області контакту є середнім контактним тиском під індентором і вимірюється в H/m^2 або в Паскалях.

Форма індентора впливає на розподіл значень контактного тиску під індентором, а також деформацій і напружень. Таким чином, при застосуванні однакового зусилля до інденторів різної форми, отримані значення площі відбитків будуть різнитися. Цей факт впливає на те, що результати, отримані різними методами вимірювання твердості з використанням інденторів різної форми не можуть бути однозначно зіставлені один з одним. Перерахунок значень твердості між шкалами можливий тільки для певних груп металів і сплавів, що мають однакоvu залежність $\sigma(\epsilon)$.

Описані вище положення справедливі для випадку квазістатичного навантаження, за якого в циклі навантаження прикладають плавно, деформація відбувається поступово, після чого здійснюють витримку під час досягнення максимального навантаження протягом певної кількості часу, зазвичай від одиниць до десятків секунд. У цей час у деформованому матеріалі під індентором відбувається релаксація напружених станів, що дає змогу виключити вплив руху дислокацій на результат вимірювання. Пружна деформація під індентором впливає тільки на різницю між площею контакту індентора з поверхнею під навантаженням і після зняття навантаження.

Динамічність навантаження зразка при одновісному деформуванні характеризується:

- швидкістю деформації (в $1/\text{с}$);
- швидкістю наростання навантаження (у $\text{кгс}/\text{мм}^2/\text{с}$);
- швидкістю удару (у $\text{м}/\text{с}$).

Найточнішою характеристикою динамічного процесу навантаження є швидкість деформації. Оскільки процес деформування під час удару має нестационарний характер, користуються умовним поняттям середньої швидкості деформації.

Експериментально встановлено, що підвищення швидкості деформації за нормальної температури призводить до збільшення межі плинності як за стиснення, так і за розтягування різних матеріалів. Так при зменшенні статичної межі плинності сталі вплив швидкості удару на динамічну межу плинності помітно зростає. Зі зростанням швидкості деформації збільшення динамічної межі плинності зменшується.

1.2. Визначення твердості за методом Брінелля

Відповідно до ДСТУ ISO 6506-1:2007 [2] метод Брінелля - один з основних методів визначення твердості. Це один із основних статичних методів дослідження твердості та відноситься до методів вдавлювання.

Кулька із загартованої сталі діаметром D вдавлюється в зразок або модель під дією навантаження P , після зняття якого вимірюють діаметр відтиску d (рис. 2.1).

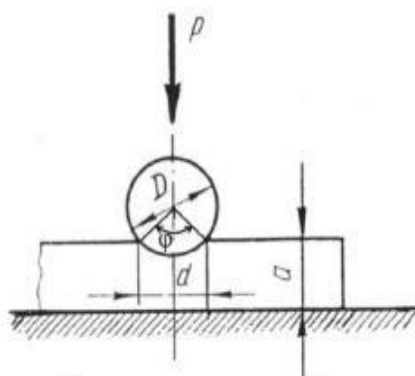


Рисунок 1.3 – Схема випробування твердості за методом Брінелля

Всі числа твердості позначають літерою Н від англ. “Hardness” – твердість. Число твердості по Брінеллю НВ дорівнює відношенню навантаження Р (кгс) до площі кулькової поверхні відтиску F (мм²):

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2*P}{\pi*D(D-\sqrt{D^2-d^2})}, \quad (1.3)$$

де, Р – навантаження (кгс), D – діаметр кульки (мм), d – діаметр відтиску (мм);

Тому твердість по Брінеллю має розмірність напруги кгс/мм². З метою наслідування ця розмірність не була замінена на МПа, у відповідності з системою міжнародних одиниць (СІ), тим більше що з числом твердості розмірність не вказують.

Якщо Р=3000 кгс, D=10 мм та витримування під навантаженням складає 10...15 с, то ці умови випробування поряд зі значенням НВ не вказують. Будь-які інші умови випробувань обов’язково необхідно вказувати. Наприклад, 180НВ 2,5/650/25 означає твердість в 180 одиниць Брінелля при використанні кульки діаметром D=2,5 мм, при навантаженні Р=650 кгс і часу дії навантаження 25 с.

При випробуванні використовують поліровані кульки зі сталі ШХ15 з діаметрами D = 1; 2; 2,5; 5 і 10 мм, останні вважаються кращими тому, що забезпечують більшу точність вимірювання твердості. Вимірювання твердості також проводять кулькою з карбїду вольфраму. Вона дозволяє дізнатися твердість матеріалів, що перевищують показник звичайної сталі. Карбїдний індентор, як правило, потрібен для інструментальних сплавів. Кульку зі звичайної сталі використовують, вимірюючи твердість деревини, міді, алюмінію, дюралю, нержавійки, скла. Тобто, твердомір застосовують не тільки до металів. Відхилення діаметрів кульок повинні бути не більше 0,0025 мм при D = 1; 2; 2,5 мм і 0,004 мм при D = 5 і 10 мм.

Між межею міцності при розриві і твердістю по Брінеллю різних матеріалів існує залежність:

$$\sigma_B = K * HB, \quad (1.4)$$

де K – коефіцієнт жорстості.

Методом Брінелля можна випробувати матеріали с твердістю до 450 HB сталеву кулькою, тому, що при більшій твердості матеріалу кулька із загартованої сталі деформується.

Вимоги до проведення дослідження дослідження:

- зразки з твердістю вище HB 450 досліджувати забороняється;
- поверхня зразка повинна бути плоскою і очищеної від окалини та інших сторонніх речовин;
- діаметри відбитків повинні знаходитися в межах $0,2D < d < 0,6D$;
- зразки повинні мати товщину не менше 10-кратної глибини відбитка (або менше діаметра кульки);
- відстань між центрами сусідніх відбитків і між центром відбитка і краєм зразка повинні бути не менше $4d$;
- тривалість витримки під навантаженням повинна бути від 10 с до 15 с для чорних металів, для кольорових металів і сплавів - від 10 с до 180 с, в залежності від матеріалу і його твердості

Вимірювання твердості виконують на стаціонарних або переносних твердомірах типу ТБ. На (рис. 4) показана схема стаціонарного твердоміра з механічним приводом від електродвигуна. Основні механізми приладу змонтовані в масивному корпусі - 20. В його верхню частину вмонтовано шпindel - 2, у який вставляють змінний наконечник - 1. Зразок установлюють для вимірювання на столику - 23 з гладкою опорною поверхнею для плоских зразків або з призматичним заглибленням – для циліндричних. Обертанням – 10 рукою маховика - 21 за годинниковою стрілкою столик приладу піднімають за допомогою гвинта - 22 до впирання зразка в кульку, закріплену в наконечнику 1 і стискання пружини - 3 (до обмежувача - 19). Це забезпечує прикладення до зразка

попереднього навантаження 980 Н, що запобігає зміщенню зразка під час випробувань. Основне навантаження прикладається при вмиканні двигуна - 14, який через редуктор - 13, кривошип - 12, шток - 9, опорний ролик - 8 опускає велике коромисло - 6. Коромисло масою опори - 10 і важків - 11 через скобу - 5 і мале коромисло - 4 навантажує шпindel - 2, що забезпечує втискання кульки наконечника в метал. Навантаження на кульку зберігається протягом певного часу, який попередньо задають відповідним розташуванням обмежувачів 16 і 15, встановлених на валу редуктора. Через заданий проміжок часу перемикач - 17 реверсує двигун, який, обертаючись у протилежному напрямку, розвантажує кульку. Після автоматичного вимкнення двигуна обертанням маховика - 21 опускають столик твердоміра та знімають зразок. Співвідношення плечей малого коромисла – 1:4, великого – 1:10, загальне співвідношення – 1:40. комбінацію важків 11 можна регулювати величину навантаження на індентор від 980 до 29430 Н.

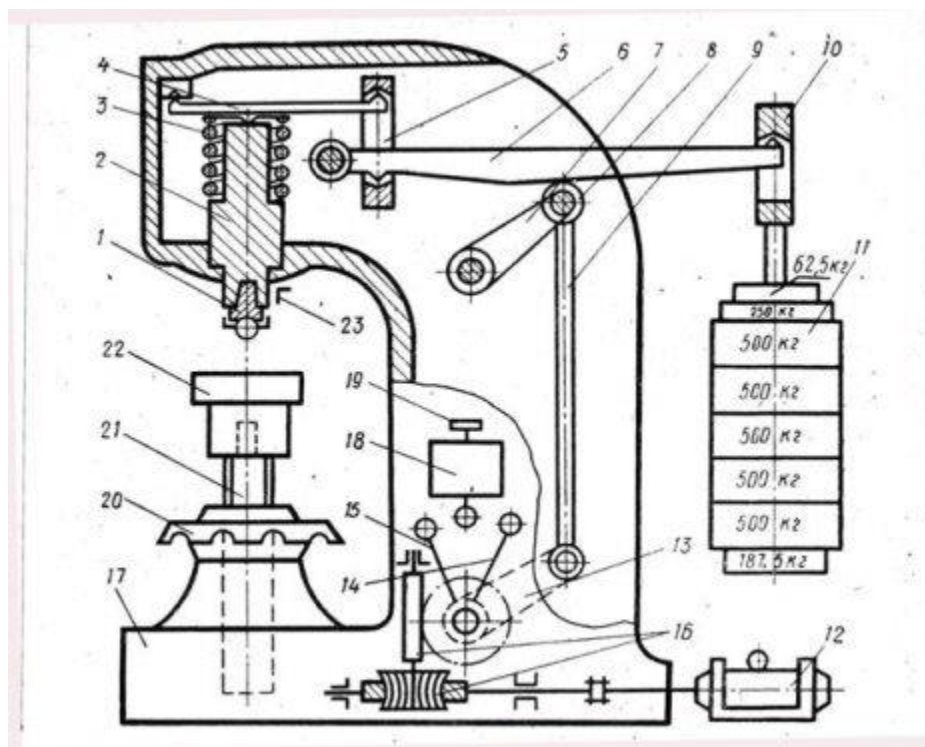


Рисунок 1.4 - Схематичне зображення твердоміра ТБ з механічним приводом. 1 – наконечник з кулькою; 2 – шпindelь; 3 – пружина; 4 – мале коромисло; 5 – опорна скоба; 6 – велике коромисло; 7 – важіль; 8 – опорний ролик; 9 – шток; 10 – опора; 11 – важки; 12 – кривошип; 13 – черв'ячний редуктор; 14 – електродвигун; 15, 16 – відповідно нерухомий і рухомий обмежувачі автоматичного перемикача; 17 – перемикач; 18 – кнопка пуску; 19 – обмежувач; 20 – корпус; 21 – маховик з гайкою; 22 – гвинт; 23 – столик для плоских зразків.

Діаметр відтиску виміряють відліковим мікроскопом (рис.1.5). У корпус 6 мікроскопа встановлено тубус 3 оптичної системи, у який вмонтовані окуляр 1, об'єктив 5 та сітка зі шкалою 2 для вимірювання діаметра відтисків. Обертанням окуляра 1 в протилежних напрямках піднімають або опускають його відносно шкали, досягаючи її чіткого зображення. Обертанням кільця 4, що забезпечує піднімання чи опускання тубуса 3, регулюється чіткість зображення контуру відтиску.

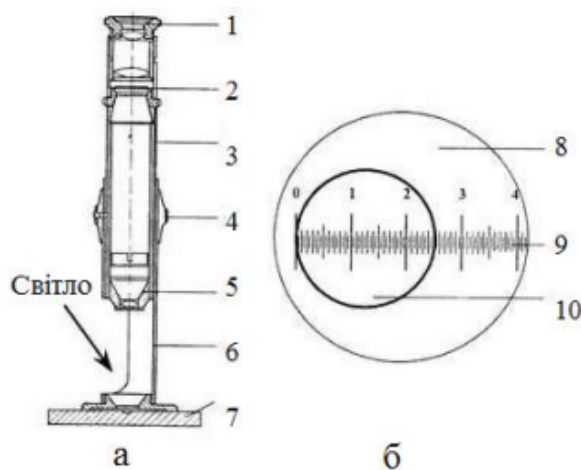


Рисунок 1.5 – Загальний вигляд відлікового мікроскопа МПБ-2 (а) та схема вимірювання діаметра відтиску за його шкалою (б)

1.2.1 Переваги і недоліки методу Брінелля.

Недоліки

1. Метод можна застосовувати тільки для металів з твердістю не більшою за 450 НВ, якщо застосовувати сталеву загартовану кульку. Та для збільшення діапазону визначення твердості, використовують кульки з твердого сплаву на основі карбїду вольфраму (WC), це дозволяє підвищити верхню межу вимірювання твердості до 600 НВW.
2. Твердість по Брінеллю залежить від навантаження, так як зміна глибини вдавлення не пропорційна зміні площі відбитка.
3. При введенні індентора по краях відбитка через видавлювання матеріалу утворюються навали і напливи, що ускладнює вимір як діаметра, так і глибини відбитка.
4. В зв'язку з використанням великого індентора, який використовується у даному твердомірі не можна перевіряти твердість тонких зразків.

Переваги

1. Знаючи твердість по Брінеллю, можна швидко знайти межу міцності і текучості матеріалу, що важливо для прикладних інженерних задач
2. Так як метод Брінелля - один з найстаріших, накопичено багато технічної документації, де твердість матеріалів вказана в відповідності до цього методу.
3. Даний метод є більш точним у порівнянні з методом Роквелла на більш низьких значеннях твердості (нижче 30 HR).
4. Також метод Брінелля менш вимогливий до чистоти підготовленої під замір твердості поверхні.

1.3 Визначення твердості за Роквеллом

Випробування на твердість за Роквеллом — це метод оцінки твердості матеріалів, що базується на вимірюванні глибини проникнення твердого наконечника (вістря, індентора) під заданим навантаженням у досліджуваний матеріал. Цей метод належить до статичних методів дослідження. Регламентується ISO 6508-1:2023 [5].

Принципова відмінність вимірювань твердості по методу Роквелла від метода Брінелля в тому, що твердість визначають за глибиною відтиску, що утворюється при вдавлюванні алмазного конуса або сталюї кульки (рис. 1.6), а не за площею відтиску.

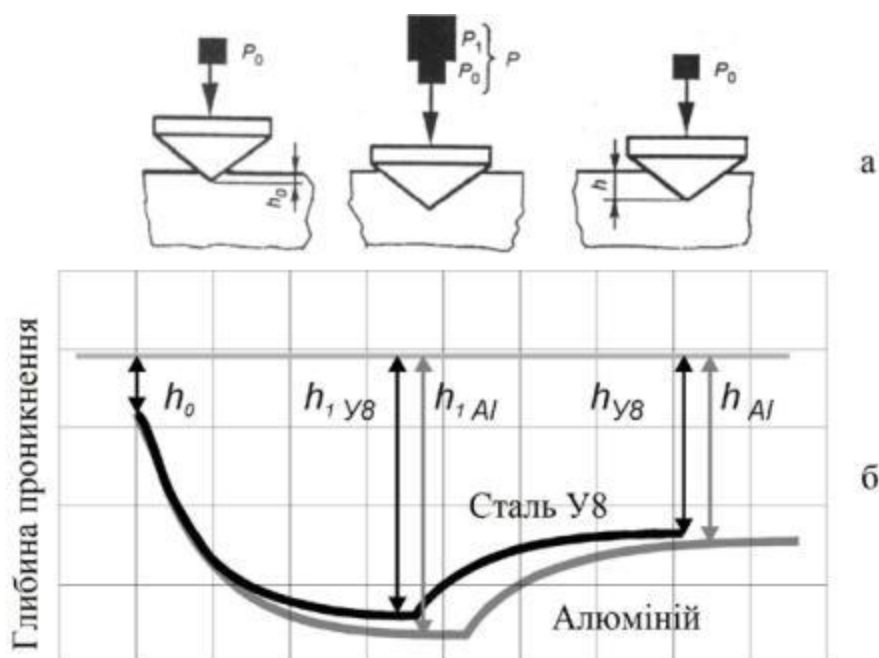


Рисунок – 1.6 Вимірювання твердості за методом Роквеллу: а – схема прикладення навантаження; б – змінення глибини проникнення наконечника.

Від твердості матеріалу, що випробується, залежить глибина заглиблення наконечника, а також тривалість процесів, які визначають тривалість прикладених навантажень. Твердість потрібно вимірювати не менш ніж у трьох точках. Для обчислення беруть середнє значення результатів другого і третього вимірювань.

Індентором є алмазний конус з кутом при вершині 120° і радіусом закруглення 0,2 мм, або кулька з загартованої сталі діаметром 1/16 дюйма (1,5875 мм). За глибиною проникнення індентора оцінюють величину твердості. Для того, щоб зафіксувати вихідне положення індентора, його піджимають до випробуваної поверхні під попереднім навантаженням $P_0=10$ кгс, а стрілку індикатора глибини проникнення виводять на нуль. Потім прикладають основне навантаження $P_1=140$ кгс при використанні алмазного конуса та $P_1=90$ кгс при використанні кулькового індентора. Загальне навантаження $P=P_0+P_1$ в першому випадку дорівнює 150 кгс, а у другому – $P=100$ кгс. Після зняття основного навантаження P_1 під залишковим навантаженням P_0 індикатор глибини проникнення прямо вказує значення твердості по Роквеллу.

Число твердості по Роквеллу при використанні алмазного конуса позначають символом HRC (від англ. “Cone” – конус) [8], а при використанні кулькового індентора – символом HRB (від англ. “Ball” – куля).

Чим менша твердість, тим більша глибина проникнення індентора e , а різниця між умовно обраним числом та глибиною проникнення:

$$HRC = 100 - e; \text{ та } HRB = 150 - e, \quad (1.5)$$

де e - вимірюється в одиницях, що дорівнюють по ціні одного ділення індикатора 0,002 мм.

Таким чином, числа твердості по Роквеллу є безрозмірними величинами.

За шкалою В вимірюють твердість порівняно м'яких об'єктів, а за шкалою С відповідно – більш твердих. Для вимірювання твердості тонких шарів або виробів використовують алмазний конус, $P_0=10$ кгс та $P_1=50$ кгс, тобто зменшене загальне навантаження на конус: 60 кгс замість 150 кгс. В цьому випадку число твердості позначають символом HRA:

$$HRA = 100 - e$$

(1.6)

Метод Роквелла не потребує вимірювати відтиск і визначати по таблицях число твердості. Значення твердості визначають після зняття основного навантаження по шкалі індикатора приладу. Простота методики вимірювання, висока продуктивність, можливість автоматизації вимірювань зробили метод Роквелла найпоширенішим способом контролю твердості в виробничих умовах.

Сучасні твердоміри Роквелла комплектують наконечниками з діаметром кульок $\varnothing 3,175$ мм; $\varnothing 6,350$ мм; $\varnothing 12,70$ мм; $\varnothing 5$ мм та $\varnothing 10$ мм. Відповідно, добавлені шкали D, E, F, G, H, K, L, M, P, R, S, V для вимірювання твердості чавуну, сплавів міді, алюмінію, цинку, свинцю, а також пластмас, дерева і фанери. Шкали HR5/60 (діаметр кульки 5 мм, навантаження 60 кгс), HR5/100; HR5/150; HR10/60; HR10/100; HR10/150 – для вимірювання твердості вуглеграфітових матеріалів (Додаток 1).[8]

Вимірювання твердості за методом Роквелла виконується на стаціонарних або переносних твердомірах з механічним чи електричним приводом. Одним з найпоширеніших стаціонарних твердомірів є прилад ТК-2 з електричним приводом важільного механізму навантаження (рис 1.7).

Перед початком вимірювання наконечник 2 закріплюють в хвостовику шпинделя 6 гвинтом 3 і тумблером вмикають електродвигун 18. Зразок 1 для вимірювання встановлюють на столику 23 і плавним обертанням маховика 22 піднімають столик до втискування зразка в наконечник з початковою силою 98 Н. Це сила створюється стисканням пружини 5. Контроль за величиною прикладеного навантаження та визначення твердості здійснюється за показами індикатора годинникового типу 7, який реєструє переміщення наконечника через мірний важіль. Початковому навантаженню 98 Н на індикаторі приладу відповідає

положення маленької стрілки навпроти червоної крапки, при цьому велика стрілка розташовується приблизно вертикально (з відхиленням від вертикалі ± 5 поділок) (рис. 6,б). Обертанням барабана 21, який через тросик 8 обертає шкалу, суміщають цифру 0 чорної шкали індикатора з великою стрілкою. Основне навантаження прикладається до наконечника при вмиканні клявішею 20 електроприводу, який складається з двигуна 18, редуктора 17 та блока кулачків 15. При обертанні кулачкового 13 блока на один оберт за посередництвом штока 14 відбувається плавне опускання та піднімання вантажного важеля 9 разом з опорою 10 та тягарцями 11, 12, 13, внаслідок чого здійснюється цикл навантаження-розвантаження наконечника основною силою. Тривалість нормального циклу – 4 с, прискореного – 2 с встановлюється відповідним положенням ручки перемикача 16. Після певного оберту кулачковий блок автоматично вимикається. Після завершення циклу навантаження основною силою, наконечник втискається в зразок тільки початковим навантаженням. Велика стрілка індикатора обертається за годинниковою стрілкою до значення твердості за відповідною шкалою (HRA, HRB, HRC) (рис. 1.7в). Вимірювання твердості завершується звільненням зразка від початкового навантаження обертанням маховика 22 проти годинникової стрілки.

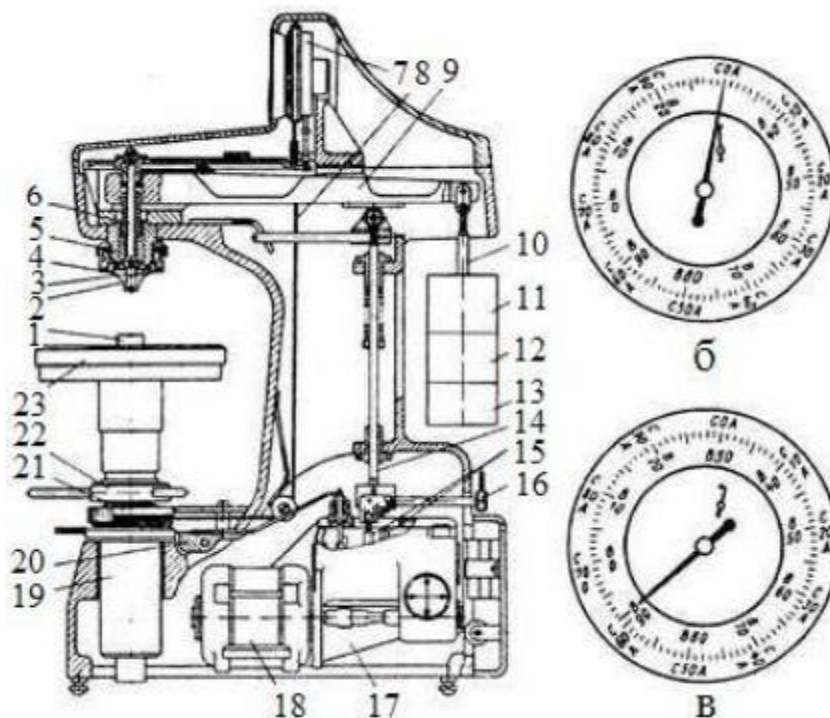


Рисунок – 1.7 Схема твердоміра ТК-2 (а) та шкали індикатора перед прикладенням початкового навантаження (б) та після усунення основного навантаження (в): 1 – зразок; 2 – наконечник; 3 – гвинт кріплення наконечника; 4 – обмежувач; 5 – пружина; 6 – шпindelь; 7 – індикатор; 8 – трос; 9 – вантажний важіль; 10 – опора; 11,12 – змінні важки; 13 – постійний важок; 14 – шток; 15 – кулачковий блок; 16 – ручка; 17 – редуктор; 18 – електродвигун; 19 – гвинт; 20 – клавіша; 21 – барабан; 22 – маховик; 23 – столик.

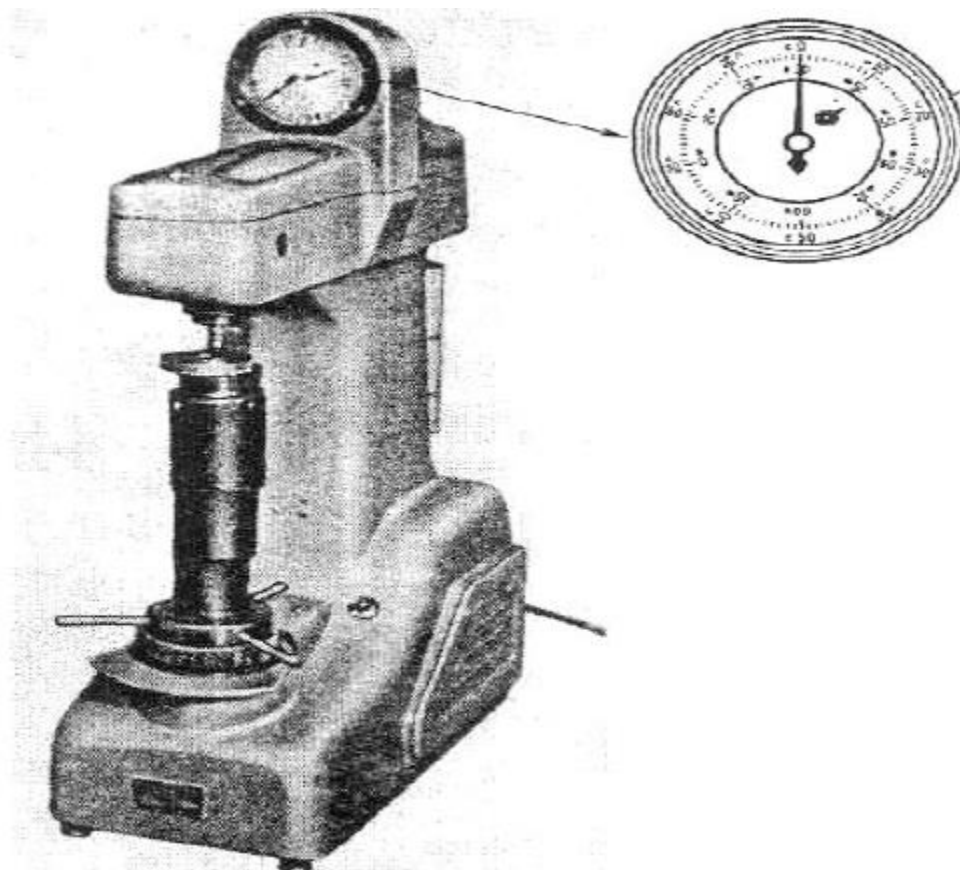


Рисунок 1.8 - Загальний вигляд твердоміра

Перші три виміри твердості після заміни наконечника або столика є пробними і не враховуються. Перевірку правильності показів твердомірів здійснюють за зразковими мірами твердості. Середнє значення твердості за п'ятьма вимірами не повинно відрізнятись від твердості міри не більш ніж на одиницю.

1.3.1 Переваги та недоліку методу Роквелла

Переваги:

- можливість проведення дослідів з високою твердістю;
- незначні пошкодження поверхні при проведенні випробування;
- простий метод, який не потребує вимірювання діаметра відбитка;
- процес випробування досить швидкий.

Недоліки:

- в порівнянні з твердоміра Брінелля і Віккерса, метод Роквелла мало точний;
- необхідно ретельно підготувати поверхню зразка.

Фактори, що впливають на точність вимірювання :

- Важливим фактором є товщина зразка. Не допускається перевірка зразків з товщиною менш десятиразової глибини проникнення наконечника
- Обмежується мінімальна відстань між відбитками (3 діаметра між центрами найближчих відбитків)
- Простота методу Роквелла (головним чином, відсутність необхідності вимірювати діаметр відбитка) привела до його широкого застосування в промисловості для перевірки твердості. Також не потрібна висока чистота вимірюваної поверхні.

1.4. Визначення твердості за Віккерсом.

Метод Віккерса - метод вимірювання твердості металів і сплавів за Віккерсом. Регламентується ISO 6507 [6]. Один з статичних методів дослідження .

Метод визначення твердості за Віккерсом заснований на дослідженні залежності глибини проникнення алмазного конуса (індентора) в досліджуваний матеріал від величини зусилля. Після зняття зусилля на поверхні зразка залишається відбиток, відповідний глибині занурення індентора. З огляду на те, що геометричні розміри індентора відомі і строго регламентовані, замість глибини занурення визначають площу відбитка в поверхневому шарі випробуваного матеріалу.

Визначення твердості за Віккерсом можливо для речовин з найвищими значеннями, оскільки в якості випробувального конуса

використовується пірамідка з алмаза, який має максимальну відому твердість.

Індентор виконаний у вигляді чотирикутної піраміди з кутами між гранями 136° . Такий кут обраний для того, щоб зблизити значення методу Віккерса з методом Бріннелю. Таким чином, значення твердості в межах 400-450 одиниць практично збігаються, особливо, в області менших значень.

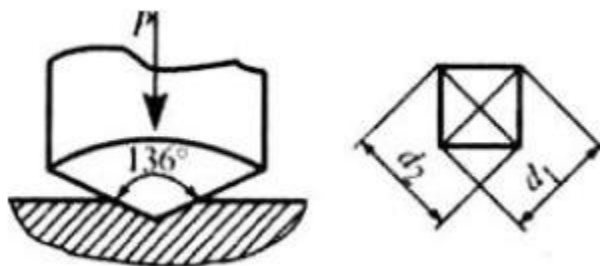


Рисунок 1.9 – Схема втискання індентора по методу Віккерса

Твердість по Віккерсу визначають шляхом вдавнення піраміди в випробуваний зразок під дією сили певної величини. Знаючи прикладену силу і площа відбитка можна визначити твердість поверхні випробуваного матеріалу.

Замість розрахунку площі відбитка використовуються значення виміряних діагоналей ромба, між якими знаходиться пряма залежність.

Підсумковий результат твердості визначають за формулою:

$$HV = 1.854 * \frac{F}{d^2}, \quad (1.7)$$

де, F – прикладена сила, d - середньоарифметичне значення довжини обох відбитків діагоналей, виміряних після зняття навантаження.

Прилад має привід демпферного типу, що дозволяє регулювати швидкість підведення індентора до випробувального виробу і обладнаний проекційною оптичною системою, що забезпечує вимірювання діагоналі відбитка на екрані відліково-мікрометричного пристрою. Конструкція приладу забезпечує автоматичну зміну положення об'єктиву і наконечника

перед і після нанесення відтиску. У конструкцію приладу входять такі основні механізми, що змонтовані всередині литого корпусу: шпindel 16, мікрометрична головка 20, вантажний важіль 21, вантажна підвіска 29, демпфер 33, механізм підйому 5 столу і панель 27 з електроапаратурою.

Шпindel і важільна система призначені для створення і передачі навантаження на випробуваний зразок. Шпindel виконаний у вигляді труби, вміщеній в шарикопідшипникових направляючих 17, на нижній частині його закріплена поворотна каретка 7, що несе на собі випробувальний наконечник 11 і об'єктив 9. Положення каретки регулюється упорами 6 і 12. У вихідному положенні каретка встановлюється в положення «об'єктив». В шпindelній трубі встановлена проєкційна частина оптичної системи, призначеної для передачі зображення відбитка на екран мікрометричної головки. Оптична система складається з ахроматичної лінзи 15, окуляра 23, дзеркала 22 і об'єктиву 9. Шпindel з'єднується з важелем 26 підшипниками 24. Для відтворення на шпindelі заданого навантаження на систему важіля навішують вантажі з допомогою вантажної підвіски 29 з набором вантажів 30. Деталь встановлюють на предметний стіл 8 і обертанням маховика 4 підтискають її до чохла 10. На вантажну підвіску встановлюють необхідні вантажі. Поворотом рукоятки 2 звільняється шток 32 демпфера 33, напруга подається на магніт 25, за допомогою якого каретка 7 перекладається з положення «об'єктив» в положення «наконечник». Шток демпфера і вантажна підвіска з вантажем опускаються вниз. Починається навантаження – проникнення наконечника в випробовуваний виріб. Під час повного навантаження замикаються контакти 31 і сигнал надходить на реле часу для відліку часу витримки. Після закінчення часу витримки, про що свідчить сигнальна лампочка 14, навантаження знімається. Потім вимикається освітлювач 28, мікроперемикач 3 розмикається, відключає магніт 25 і каретка під дією пружини 13 повертається в положення

«об'єктив». Відтиск проектується через оптичну проекційну систему на екран мікрометричної головки. Діагоналі відтиску вимірюють за шкалами 18 і 19 в двох взаємно перпендикулярних напрямках і за таблицями визначають твердість в одиницях HV. Межі виміру твердості 8 HV – 2000 HV.

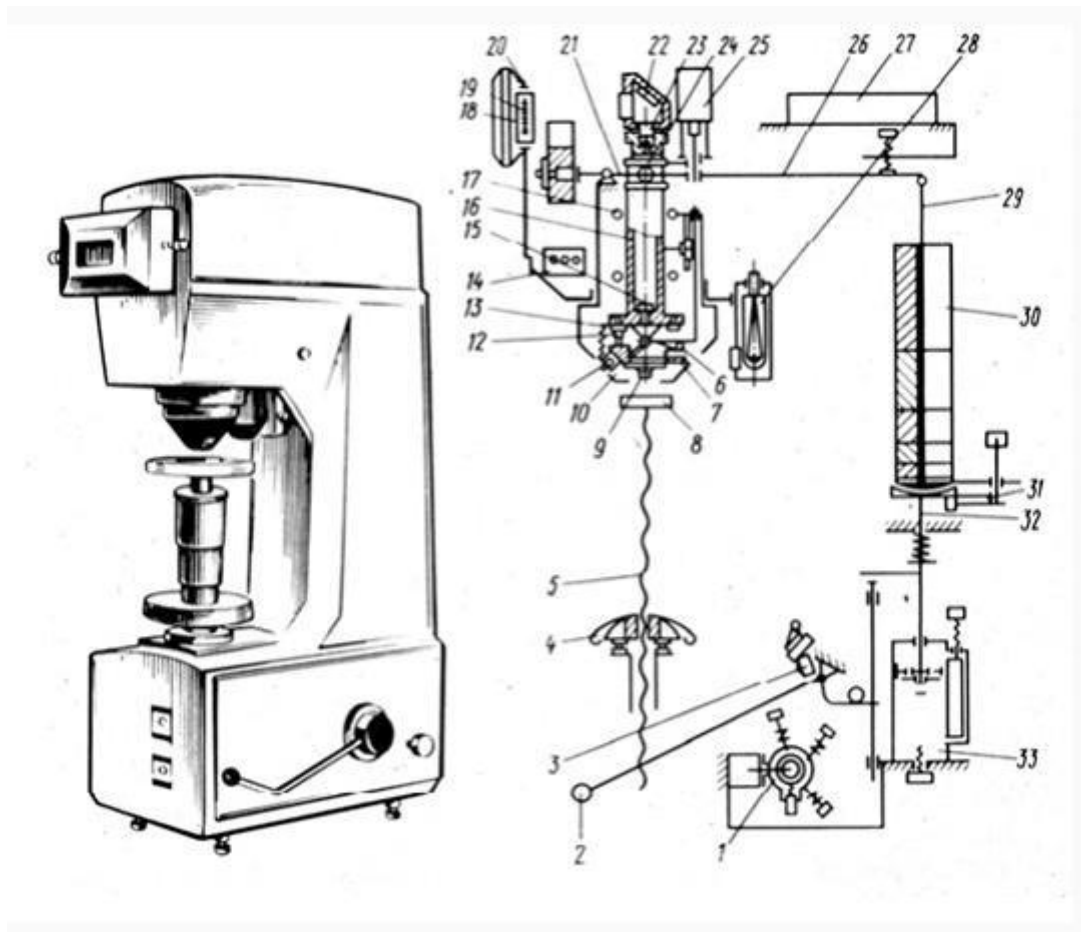


Рисунок 1.10 - Схематичне зображення приладу для вимірювання твердості ТП-7Р1

Для зниження похибки також пред'являються обмеження за розмірами випробуваного зразка. Мінімальна товщина зразка повинна бути в 1,2-1,5 разів більше передбачуваної діагоналі відбитка в залежності від виду металу (менша величина відповідає сталі, велика призначена для кольорових металів). Відстань між краєм зразка або краєм попереднього відбитка і центром відбитка має бути не менше 2,5 величини діагоналі.

Особливі вимоги пред'являються також до чистоти поверхні. Її шорсткість не повинна перевищувати 0,16 мкм, що означає необхідність в поліровці поверхні.

1.4.1 Переваги та недоліки методу Віккерса

Переваги:

- Вимірювання твердості за методом Віккерса - універсальний метод, але найбільш точних значень він дає при дослідженні речовин з високою твердістю.
- Малі зусилля і, відповідно, невеликі лінійні розміри відбитка дозволяють практично не порушувати поверхню вимірюваного матеріалу.
- Специфічна форма вимірювального інструменту – індентора. Мала площа взаємодії дозволяє вимірювати твердості окремих вкраплень або зерен в тілі зразка.

Недоліки:

- Малі лінійні розміри зразка вимагають застосування мікроскопа для вимірювання розмірів відбитка, причому, чим твердіший зразок, тим більш чітку картинку повинен передавати мікроскоп для збереження точності вимірювання.
- Основний недолік методу Віккерса укладено в самому принципі вимірювань – це залежність отриманого значення вимірюваної величини від прикладеного навантаження. Щоб уникнути похибок, жорстко регламентовані величини прикладених зусиль і час дії на зразок.
- Ще один недолік, який властивий більшості методів вимірювань – необхідність ретельної підготовки досліджуваної поверхні.

1.5. Визначення твердості за Шором.

Твердість по Шору (метод пружного відскоку бойка) цей метод вимірювання твердості являється основним динамічним методом вимірювання твердості.

Першим інструментом цього типу є так званий Склероскоп Шора, винайдений в 1907 Альбертом Ф. Шором. Ударник з алмазним наконечником скидається з певної висоти на поверхню випробуваного матеріалу. Висота відскоку є мірою твердості металу.

Відповідно до стандарту ASTM E 448 [21] використовуються дві моделі приладу: модель С і модель D. Розрізняються ці два твердоміри ударниками (форма та маса) і висотою падіння. Шкала твердості склероскопів Шора складається з чисел, визначених шляхом поділу на 100 середньої висоти відскоку ударника від конкретного матеріалу, що досліджується. Таким чином, шкала твердості по Шору визначається матеріалом, використаним для калібрування (еталон) і моделлю твердоміра. Важливо зазначити, що випробування твердості вимірювання повинні здійснюватися перпендикулярно до досліджуваної поверхні. У випадку твердомірів по Шору (рис.11), де для прискорення ударника використовується лише гравітація, робота можлива лише у вертикальному положенні.

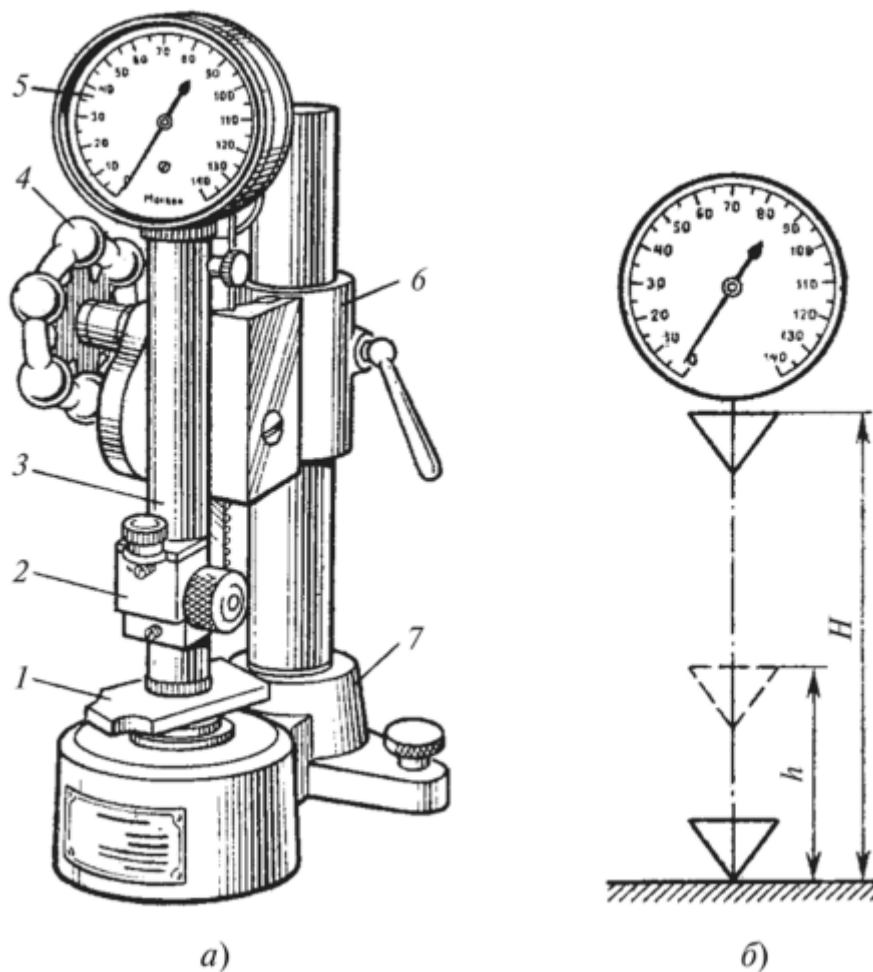


Рисунок – 1.11 Прилад для випробування твердості за методом Шора: а — загальний вигляд приладу (склероскопа); б— схема випробування.

Вимоги до зразків для випробувань

- В якості досліджуваних матеріалів для зразків можна використовувати
- метали і сплави та вироби з них.
- При використанні твердоміри, що встановлюються безпосередньо на зразки (вироби), маса останніх повинна бути)
- не менше 5 кг. При установці зразків (виробів) на столик твердоміра маса останніх повинна бути не менше 0,1 кг, а товщина не менш 10 мм.
- Шорсткість зразків (виробів) у місці випробування повинна бути $R_a < 2,5$ мкм.

- Виріб або зразок не повинні зміщуватися при проведенні випробувань.
- Форма зразків (виробів) у місці випробування може бути як плоскої, так і циліндричної.

Випробування проводять при температурах від 10 до 35 °С з використанням твердомірів, що мають ціну поділки шкали не більше 1 одиниці твердості по Шору (HSD). Прилад і зразки (вироби) установлюють один щодо одного строго під кутом 90° з використанням з рівнів з щільним притисненням ковпачка приладу до випробуваної поверхні. Швидкість проведення випробувань повинна скрадати не більше 5 ударів в 10 с. Відстань між двома сусідніми відбитками або від краю зразка (вироби) - не менше 2 мм. Не допускається більше одного удару бойка в одну і ту ж точку досліджуваної поверхні.

Число твердості по Шору позначається цифрами, що характеризують величину твердості, зі що стоять після них символом Н 80, наприклад, 95 Н 80. Число твердості вказується з округленням до цілого числа. Величина твердості по Шору не має точного перекладу на інші величини твердості або на міцнісні властивості, одержувані при механічних випробуваннях.

Оскільки прилад легко може бути встановлений на випробуваному об'єкті, його застосовують для вимірювання твердості великих і важких виробів: колінчастих валів, головок шатуна, циліндрів, валків прокатних станів та інших деталей, твердість яких важко вимірювати іншими приладами

1.5.1 Переваги та недоліки методу

Переваги:

- Перевагами цього методу є простота роботи з приладом
- висока продуктивність
- можливість перевірки деталей без порушення якості поверхні.

Недоліки:

- До недоліків слід віднести те, що висота відскоку залежить від модуля пружності E , а значить, матеріали з різних модулем пружності дають недостовірні результати;
- Високі вимоги до шорсткості випробувального зразка.
- Необхідна винятково рівна поверхня для встановлення приладу, найменше відхилення зумовить значну похибку приладу.

1.6 Висновки за розділом 1.

1.Зроблено аналіз існуючих статичних та динамічних методів виміру твердості. Розглянуто фізичні та методичні засади динамічних методів вимірювання твердості;

2.Розглянуто особливості апаратної реалізації методів вимірювання та вимоги до основних метрологічних характеристик перетворювачів;

3.Проаналізовано переваги та недоліки методів вимірювання.

2. АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ ТВЕРДОСТІ ЗА ШКАЛАМИ ЛІБА ТА РОЗРОБКА ПРОЕКТУ ПОВІРОЧНОЇ СХЕМИ ДЛЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ ЗА МЕТОДОМ ЛІБА.

2.1. Дослідження методу вимірювання твердості методом Ліба.

На початку 1970-х Дітмар Ліб вивчав різні методи вимірювання твердості, роблячи акцент на портативні пристрої, наприклад, засновані на методах Шора. Найчастіше використовуваними портативними твердомірами були твердоміри динамічного типу, де навантаження прикладено імпульсно. Виникло питання, як можна без втрати точності збільшити діапазон вимірювань та розширити рамки застосування приладу, наприклад, незалежність від напрямку тестування, прискорення роботи, комфорт для користувачів.

Підсумком роботи Ліба став винахід нового динамічного методу та розробка приладу у 1975 році у співпраці з компанією EQUOTIP [9].

Суть методу полягає у вимірі співвідношення швидкостей падаючого ударника до і після зіткнення з поверхнею випробуваного зразка. Твердість по Лібу HL розраховується відповідно до формули:

$$HL = 1000 \frac{v_R}{v_A} \quad (2.1)$$

де v_R - швидкість відскоку ударника; v_A - швидкість удару.

Головна ідея Ліба полягає в тому, щоб виміряти швидкість удару і відскоку безконтактно - через ЕРС, що генерується магнітом, що рухається крізь котушку індуктивності, встановлену на направляючій трубці пристрою. Наведена ЕРС прямо пропорційна швидкості магніту, встановленого всередині ударника. Сигнал наведеної ЕРС записується в електронному блоці з індикатором і пікові значення індуктованої напруги

використовуються для отримання чисел твердості Ліба HL. Форма сигналу наведеної ЕРС є унікальною для кожного типу твердоміра.

2.1.1 Аналіз апаратної реалізації засобів динамічних методів виміру твердості та їх метрологічного забезпечення.

Відповідно до Європейських стандартів 16859-1:2015 [7] твердомір, що використовується для вимірювання твердості по Лібу (рис. 2.1), складається з ударного перетворювача та електронного вимірювального блоку, що визначає швидкість удару та відскоку ударника.

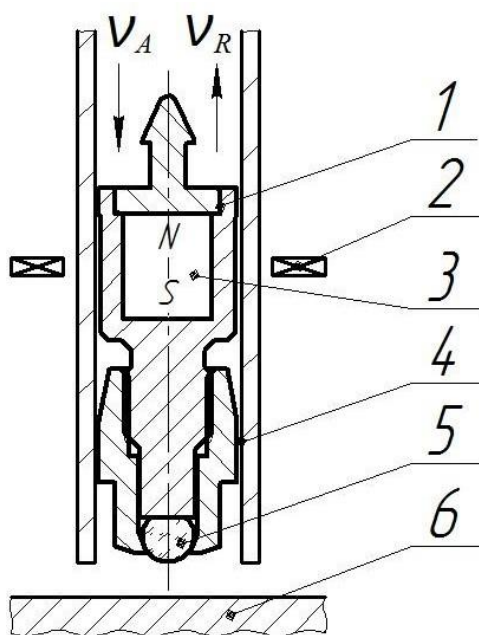


Рисунок 2.1 – Схема вимірювання твердості по Лібу:

1 – корпус ударника, 2 – котушка індуктивності, 3 – постійний магніт (N-північний полюс, S-південний полюс), 4 – спрямовуюча трубка; 5 – сферичний наконечник (індентор); 6 – випробуваний зразок.

На підставі аналізу процесів, що відбуваються при вимірюванні твердості динамічними методами, а також вивчення конструктивних рішень була складена узагальнена структурна схема засобів вимірювання твердості за шкалою Ліба (рис. 2.2):

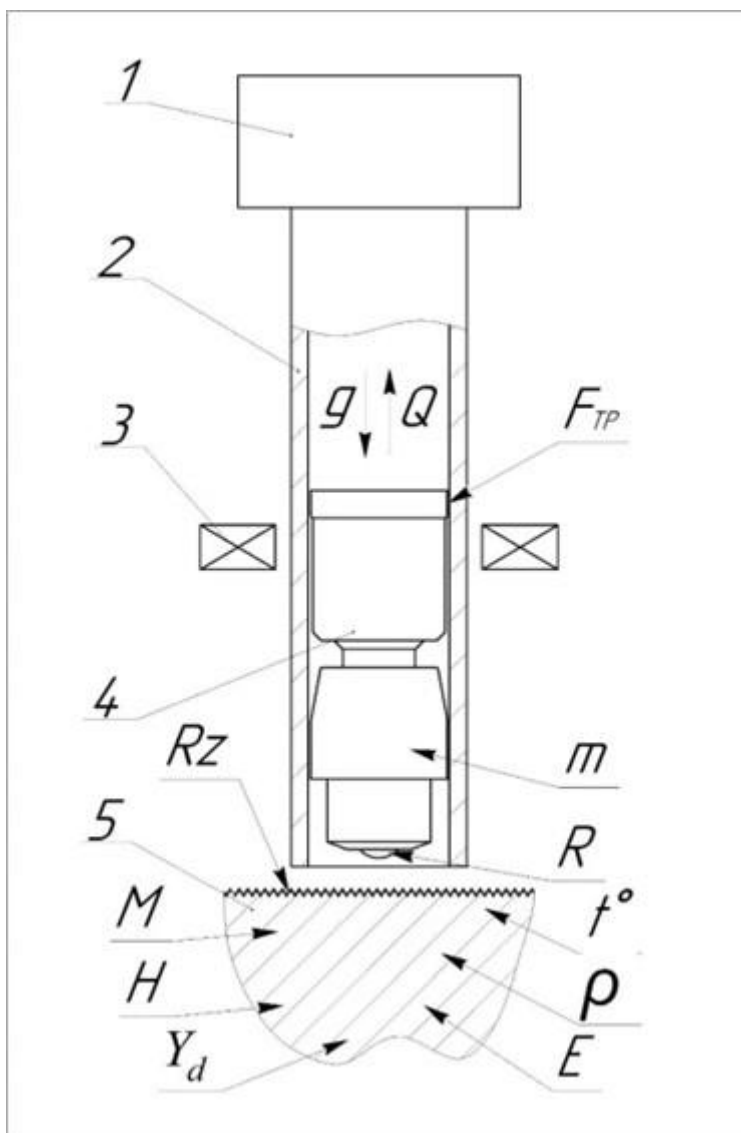


Рисунок 2.2 – Узагальнена структурна схема засобів вимірювання твердості за шкалою Ліба: 1 – блок утримання та розгону/скидання ударника; 2 – напрямна трубка; 3 – вузол виміру швидкостей v_A і v_R ; 4 – ударник; 5 – випробуваний зразок. Де E - модуль пружності, Y_d - динамічна межа текучості, m - маса ударника, R - радіус сферичного наконечника, M - маса, H - товщина, ρ - щільність, t° - температура навколишнього середовища, Rz - шорсткість поверхні, g - прискорення вільного падіння, Q - сила опору повітря, F_{TP} - сила тертя, що виникає між стінками напрямної трубки та ударником.

Вимірюваним параметром є коефіцієнт відновлення e , що є за визначенням ставленням швидкості відскоку v_R до швидкості удару v_A : $e \equiv \frac{v_R}{v_A}$. Значення величини твердості за Лібом обчислюється за формулою:

$$HL = 1000 \frac{v_R}{v_A} \equiv 1000 * e \quad (2.2)$$

Відповідно модуль пружності E та динамічна межа плинності Y_d є основними властивостями матеріалу, що визначають значення твердості за шкалами Ліба.

Маса ударника m , радіус сферичного наконечника R , швидкість удару v_A є основними контрольованими параметрами твердомірів Ліба.

Прискорення вільного падіння g , сила опору повітря Q , сила тертя $F_{\text{тр}}$ є джерелом систематичного відхилення швидкості ударника від номінального. Їх вплив враховується і компенсується шляхом незалежного виміру та налаштування швидкості удару v_A .

Вплив температури навколишнього середовища на твердомір враховується відповідно до його експлуатаційної документації. Зміна твердості за шкалою Ліба матеріалу зразка при зміні температури є його природною властивістю.

До складу твердоміра (рис. 2.3) входить ударник, що складається з сферичного наконечника і корпусу, в який вбудований постійний магніт

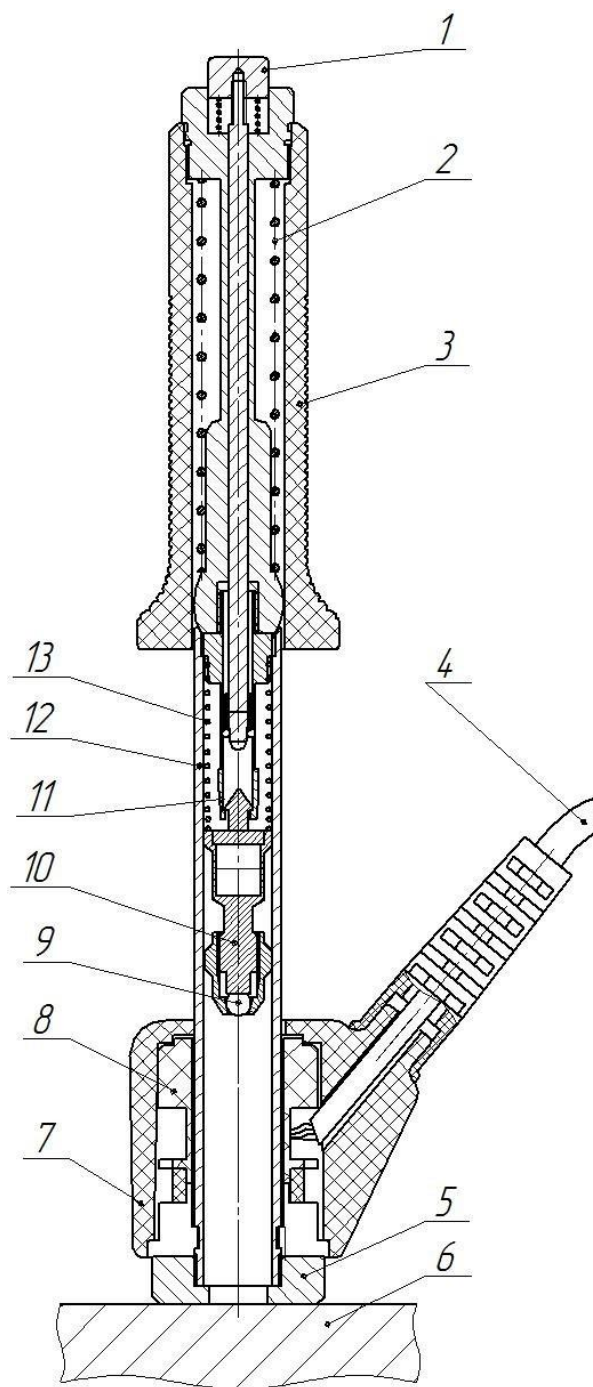


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення твердоміра методу Ліба:

1 – кнопка спуску; 2 - пружина, що зводить; 3 – труба, що зводить; 4 – сполучний кабель; 5 - опорне кільце; 6 – випробуваний зразок; 7 – корпус котушки індуктивності; 8 – котушка індуктивності; 9 – сферичний наконечник (індентор); 10 – ударник; 11 – цанга; 12 - напрямна трубка; 13 - ударна пружина.

Розглянемо принцип дії твердоміра (рис 2.4). На нижній частині ударного перетворювача має бути щільно закріплене опорне кільце. Опорна поверхня повинна бути сконструйована таким чином, щоб запобігти зсуву ударного перетворювача під час вимірювання. Процедура вимірювання полягає в наступному: Необхідно встановити перетворювач на випробуваний зразок до поверхні та притиснути його торцевою площиною до поверхні, не допускаючи похитування. Звести пружинний механізм перетворювача в робоче положення, зсунувши трубку, що зводить, вниз до клацання, що свідчить про захоплення ударника цангою. Плавню повернути трубку, що зводить, не допускаючи ударів і зриву ударника [11].

Переконалися у стійкості перетворювача на поверхні випробуваного зразка і натиснути кнопку спуску перетворювача, при цьому ударник звільниться від захоплення цанги і під дією зведеної ударної пружини зробить удар по поверхні випробуваного зразка.



Рисунок 2.4 – Проведення вимірювань твердоміром методом Ліба

Ударник, пролітаючи крізь котушку індуктивності, наводить в ній ЕРС (рис. 2.5). Котушка розташовується на трубці таким чином, щоб у момент вимірювання швидкості відстань від сферичного наконечника до поверхні зразка випробуваного становила не більше 2 мм.

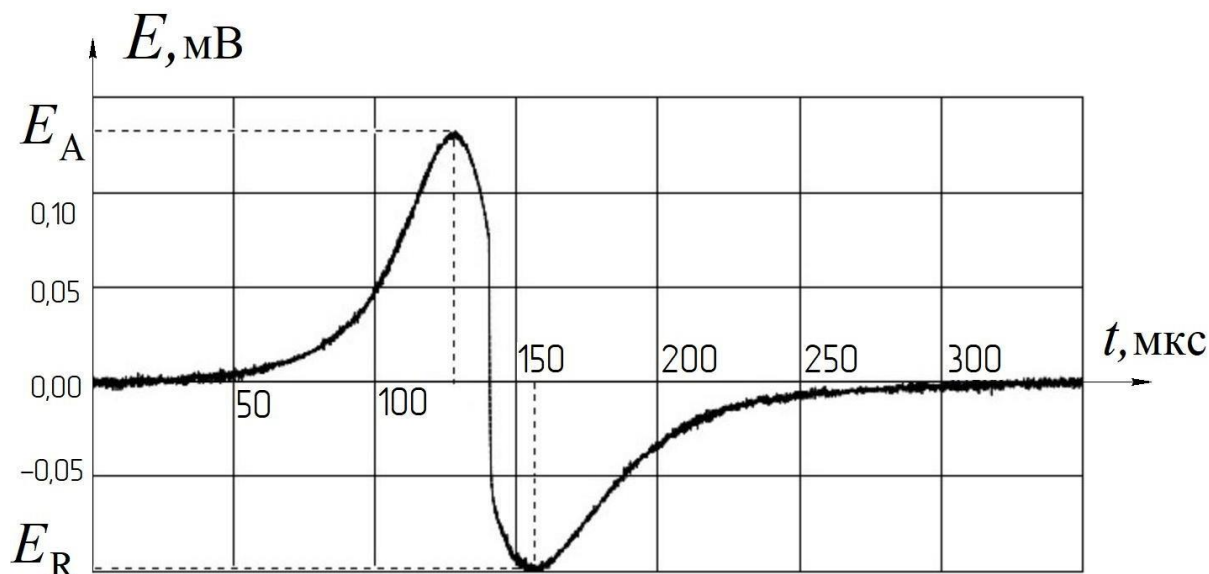


Рисунок 2.5 – Діаграма ЕРС $E(t)$, наведеної на котушці індуктивності при вимірі твердості.

2.1.2 Аналіз процесу взаємодії ударника з випробуваним зразком при вимірювання твердості методом пружної віддачі.

У ході вимірювання твердості за методом Ліба ударник масою m розганяється до швидкості удару V_A з поверхнею матеріалу при вільному чи прискореному русі. У ході взаємодії кульового наконечника (індентора) ударника з випробуваним зразком відбувається деформація поверхні зразка під індентором, доки не буде поглинена вся кінетична енергія ударника.

Нарешті в результаті вивільнення пружної напруги відбувається відскок ударника. При цьому процес зіткнення ударника з поверхнею матеріалу в часі t описується рівнянням:

$$\frac{d^2s}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{m_M} P(t) = -a(t)$$

(2.3)

де v - швидкість впровадження; S - характеристика лінійного переміщення ударника (глибина деформування матеріалу); m_M - маса матеріалу; P - контактна сила, a - ударне прискорення, t - час процесу взаємодії.

Процес зіткнення ударника з поверхнею матеріалу складається з двох етапів: навантаження та розвантаження. У ході етапу навантаження ударник працює тільки в області пружної деформації (твердість індентора $>$ твердості матеріалу), а матеріал відчуває пружнопластичне деформування. У процесі впровадження ударника контактна сила P та ударне прискорення a постійно наростають, швидкість впровадження v падає, а величина деформації S збільшується. Наприкінці навантаження кінетична енергія ударника перетворюється на потенційну енергію стиснутих тіл крім роботи, витраченої на пружнопластичне деформування індентора і матеріалу; при цьому величини ударного прискорення та деформації максимальні (a_{max} , S_{max}), а швидкість $v = 0$. У наступний момент часу настає етап розвантаження - відновлення пружних деформацій. Значення P і a падають до нуля, ударник під дією пружних сил набуває кінцевої швидкості відскоку, матеріал відновлюється до глибини пластичного відбитка S , а потенційна енергія стислих тіл перетворюється на кінетичну енергію ударника, що відскакує.

Для зручності процес взаємодії індентора з випробуваним зразком розіб'ємо на 3 етапи, як показано на (рис. 2.6):

- початок контакту ударника із матеріалом (розгін);
- контакт тіл, що вдаряються (впровадження);
- виходу ударника з контакту (відскок).

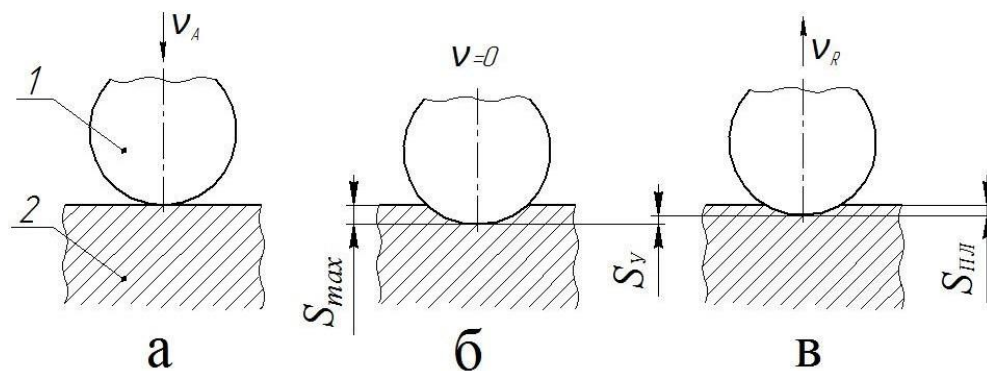


Рисунок 2.6 – Етапи взаємодії індентора ударника (1) з випробуваним зразком (2).

Зміна швидкості ударника у часі представлено (рис 2.7)

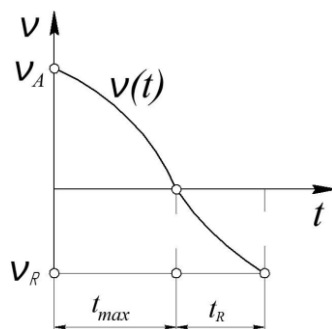


Рисунок 2.7 – Залежність швидкості від часу процесу зіткнення, де v_a – швидкість удару (початкова швидкість зіткнення з матеріалом); v_R – швидкість відскоку ударника; t_{max} – тривалість пружнопластичної деформації; t_R – тривалість відновлення пружних деформацій.

Поточне та максимальне прискорення ударника в процесі зіткнення розраховується шляхом диференціювання сигналу (рис. 2.8). Знаючи масу ударника і отримавши прискорення, можна розрахувати контактне зусилля:

$$P(t) = -m * a(t) = -m * \frac{dv(t)}{dt} \quad (2.4)$$

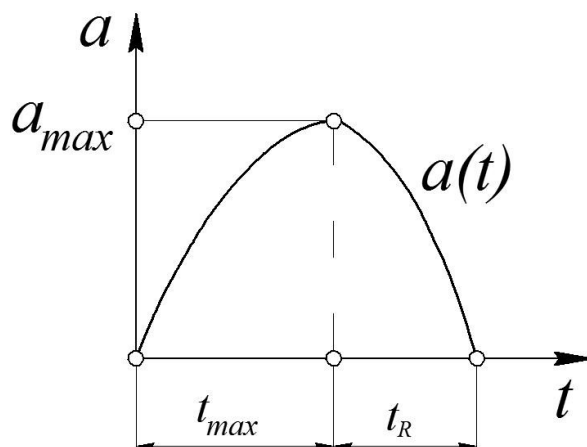


Рисунок 2.8 – Залежність прискорення від часу, де a і a_{max} – поточне та максимальне ударне прискорення; t_{max} – тривалість пружнопластичної деформації; t_R – Тривалість відновлення пружних деформацій.

Порівняно зі статичним вдавлюванням, тривалість застосування навантаження при динамічних вимірах твердості залежить від фрикційних властивостей та коефіцієнта відновлення (який сам по собі залежить від швидкості зіткнення) випробуваного зразка та індентора ударника.

Глибину впровадження індентора (рис. 2.9) ударника [12] в випробуваний зразок можна розрахувати шляхом інтегрування вихідного сигналу швидкості за формулою:

$$S(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt$$

(2.5)

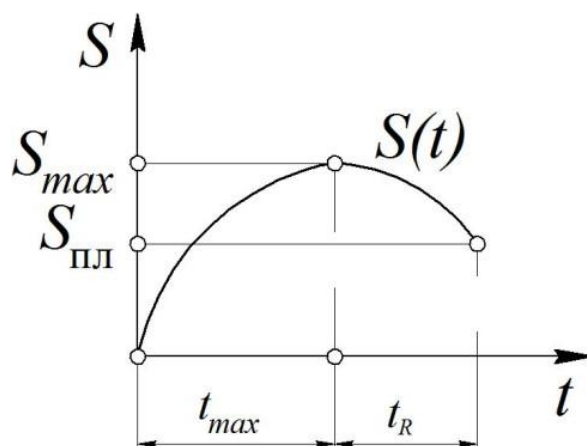


Рисунок 2.9 – Залежність глибини застосування від часу, де S_{max} і $S_{пл}$ – максимальна пружнопластична та пластична (залишкова) деформація матеріалу; де t_{max} – тривалість пружнопластичної деформації; t_R – тривалість відновлення пружних деформацій.

Усі перелічені параметри, обчислювані з вихідного сигналу, допомагають описати випадок контакту падаючого ударника на зразок, проте не використовуються для розрахунку твердості за методом Ліба. Основним контрольованим параметром при вимірі твердості за методом Ліба є швидкість відскоку ударника з нормованими параметрами, що падає на поверхню матеріалу із заданою швидкістю удару.

При цьому для забезпечення єдності вимірів нормуються такі параметри:

- кінетична енергія ударної взаємодії;
- швидкість ударника у момент контакту з поверхнею;
- відстань між індентором та поверхнею випробуваного зразка в момент вимірювання швидкості;
- маса ударника;
- матеріал та радіус індентора;
- маса та товщина випробуваного зразка.

Основним параметром, що бере участь у розрахунку твердості методом Ліба є коефіцієнт відновлення. Коефіцієнт відновлення e визначається як відношення швидкості відскоку ударника від поверхні випробуваного зразка v_R та швидкості удару v_a і записується як:

$$e = v_R/v_a \quad (2.6)$$

2.1.3 Теоретичний аналіз залежності коефіцієнта відновлення від параметрів твердоміра та механічних властивостей випробуваного зразка.

Для знаходження контактних напруг при пластичному ударі застосовується квазістатичний підхід у припущенні, що швидкість удару

мала порівняно зі швидкістю пружної хвилі. Наявність пластичного перебігу зменшує інтенсивність контактного тиску та енергію, що йде на пружний хвильовий рух. Співвідношення для непружних контактних напруг за статичних умов можуть бути використані при швидкості удару до 500 м/с з метою дослідження процесу зіткнення при нормальному ударі по відношенню до поверхні.

Кінетична енергія переходить у локальні та пружні пластичні деформації контактуючих тіл до моменту максимального стиснення і знаходиться за формулою:

$$\frac{1}{2}mv_A^2 = W = \int_0^{\delta_{max}} Pd\delta, \quad (2.7)$$

де m - маса ударника, P - Контактне зусилля, δ - сукупне пружно- пластичне взаємне зближення (стиснення) зразка та індентора. Після моменту максимального стиснення кінетична енергія при відскоку знаходиться за формулою (2.6) і дорівнює роботі, виконаній за час пружного відновлення, тобто:

$$\frac{1}{2}mv_A^2 = W' = \int_0^{\delta_{max}} P'd\delta', \quad (2.8)$$

де величини зі штрихом відносяться до відновлення. Далі потрібно визначити максимальну контактну напругу, тривалість удару та коефіцієнт відновлення v_R/v_A через швидкість удару v_A та властивості вдаряючихся тіл.

Пластична течія починається в точці під поверхнею, і, у міру того, як поширюється пластична зона, середній контактний тиск зростає від $\sim 1.1Y$ до $\sim 3Y$, коли досягається повна пластичність (Y - Межа текучості). Надалі, якщо немає деформаційного зміцнення, контактний тиск зберігається приблизно постійним і називається тиском течії або тиском текучості.

Оскільки більшість зіткнень металевих тіл призводить до повністю пластичного вдавлювання, зосередимо увагу на розгляді цього режиму. У статичному аналізі, що наводиться, припускається, що повне пружне і

пластичне стиснення δ пов'язане з розмірами контактної зони співвідношенням $\delta = a^2/2R$, а середній контактний тиск p_m постійний і дорівнює $3.0Y$. Ці припущення добре відповідають експериментальним результатам. Використовуючи рівняння (2.5), отримаємо таке рівняння:

$$\frac{1}{2}mv_A^2 = \int_0^{a_{max}} \pi a^2 p_d \left(\frac{a}{R}\right) da = \frac{\pi a^4 p_d}{4R} \quad (2.9)$$

де p_d - середній контактний тиск під час динамічного навантаження. Зазначимо, що величина $\frac{\pi a^4}{4R}$ є "уявною" величиною об'єму матеріалу V , що заміщується індентором радіуса R .

Використовуючи рівняння $a = \left(\frac{3PR}{4E^*}\right)^{1/3}$ для виключення радіусів, кінетичну енергію відскоку можна визначити через розмір області вдавнення за формулою:

$$\frac{1}{2}mv_R^2 = W' = \frac{3P^2}{10aE^*} = \frac{3}{10}\pi^2 a^2 p_d^2 / E^*, \quad (2.10)$$

де E^* приведений модуль пружності, $\frac{1}{E^*} = \left(1 - \frac{v_1^2}{E_1}\right) + \left(1 - \frac{v_2^2}{E_2}\right)$, де v_1, v_2 - коефіцієнти Пуассона, E_1, E_2 модулі пружності для взаємодіючих матеріалів.

Виключаючи a з рівнянь (2.7) і (2.8), отримуємо вираз для коефіцієнта відновлення (2.9):

$$e^2 \equiv \frac{v_R^2}{v_A^2} = \frac{3\pi^{5/4} p_d^3}{10 E^* \left(\frac{1}{2}mv_R^2\right)^{3/4}} \quad (2.11)$$

або, якщо записати $p_d \approx 3.0Y_d$ (Y_d - динамічна межа текучості), то отримаємо рівняння:

$$e \approx 3.8 \left(\frac{Y_d}{E^*}\right)^{1/2} \left(\frac{1}{2}mv_A^2/Y_d R^3\right)^{-1/8} \quad (2.12)$$

Із цих рівнянь, підтверджених результатами експериментів, видно, що в загальному випадку коефіцієнт відновлення тіл, які зазнають удару і здатні зазнавати пластичної деформації, не буде постійним. За дуже

низьких швидкостей удару виникаючі тиски будуть недостатніми для того, щоб спричинити пластичну деформацію. Процес зіткнення буде повністю пружним, а коефіцієнт відновлення дорівнюватиме одиниці [13]. У міру збільшення швидкості удару ступінь пластичної деформації неухильно зростатиме, і відбудеться відповідне зменшення коефіцієнта відновлення.

Таким чином, з теоретичного аналізу процесу удару випливає, що відповідно коефіцієнт відновлення є функцією таких параметрів вимірювальної установки та умов вимірювань:

$$e \sim v_A^{-1/4}; e \sim m^{-1/8}; e \sim R^{3/8} \quad (2.13)$$

Візьмемо похідні рівняння (2.12) за переліченими параметрами й отримаємо формули:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial v_A} &= e \left(-\frac{1}{4}\right) v_A^{-1}, \text{ звідки:} \\ \frac{\Delta e_v}{e} &= -\frac{1}{4} v_A^{-1} \Delta v = -\frac{\Delta v_A}{4v_A} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial m} &= e \left(-\frac{1}{8}\right) m^{-1}, \text{ звідки:} \\ \frac{\Delta e_m}{e} &= -\frac{\Delta m}{8m} \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial R} &= e \frac{3}{8} R^{-1}, \text{ звідки:} \\ \frac{\Delta e_R}{e} &= \frac{3}{8} \frac{\Delta R}{R} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Відповідно сумарна відносна невизначеність вимірювальної установки, пов'язана з похибкою параметрів установки, розраховується за формулою:

$$\Delta e_{\Sigma} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\Delta e_i}{e}\right)^2} \quad (2.17)$$

де $i = v, m, R$.

Формули (2.12), (2.13) і (2.14) виражають відносну зміну коефіцієнта відновлення e від відносної зміни параметрів установки і дають змогу

розрахувати внесок невизначеності кожного з параметрів у невизначеність результату вимірювання.

2.2 Державний первинний еталон одиниць твердості за шкалами Брінелля та Віккерса

Державна повірочна схема для засобів вимірювань твердості за шкалами Брінелля та Віккерса (рис. 2.10) призначений для відтворення одиниць твердості за шкалами Брінелля та Віккерса та передача їх робочим еталонам (мірам твердості) 1-го розряду методом непрямих вимірювань відповідно до ДСТУ 3870-99 [3] та для забезпечення єдності вимірювань у країні.



Рисунок 2.10 - Державна первинний еталон для засобів вимірювань твердості за шкалами Брінелля та Віккерса

2.2.1 Комплекс засобів вимірювальної техніки з якого складається державний первинний еталон вимірювань твердості за шкалами Брінелля та Віккерса та метрологічні характеристики ЗВТ.

До складу входить:

- стаціонарний прилад безпосереднього навантаження з набором спеціальних гир.
- мікроскоп з номінальною ціною поділки 1 мкм для вимірювань діаметрів відбитків
- мікроскоп з номінальною ціною поділки 0,2; 0,3 і 1,2 мкм для вимірювань діагоналей відбитків
- індентори — сталеві та твердосплавні кульки діаметром 2,5; 5,0 і 10,0 мм;
- індентор — правильна чотиригранна алмазна піраміда з кутом при вершині між протилежними гранями

Діапазон значень твердості, що відтворюються еталоном, становить за шкалами Брінелля від 8 НВ до 450 НВ, якщо застосовують сталеву кульку, і від 95 НВW до 650 НВW, якщо застосовують твердосплавну кульку, за шкалами Віккерса від 8 НV до 2000 НV.

Державний первинний еталон забезпечує відтворення одиниці твердості:

- за шкалами Брінелля з середнім квадратичним відхиленням результату вимірювань S_B , що не перевищує $1 \cdot 10^{-3}$ при 10 незалежних спостереженнях. Невилучена систематична похибка O_B не повинна перевищувати $3 \cdot 10^{-3}$;
- за шкалами Віккерса із середнім квадратичним відхиленням результату вимірювань що не перевищує $2 \cdot 10^{-3}$ та $1 \cdot 10^{-3}$ при 10 незалежних спостереженнях і навилученої систематичної похибки O_B , яка не повинна перевищувати $6 \cdot 10^{-3}$ та $3 \cdot 10^{-3}$ при

навантаженнях від 9,8 Н до 19,6 Н та від 49,0 Н до 980,7 Н відповідно.

Для забезпечення відтворення одиниць твердості за шкалами Брінелля і Віккерса із визначеною точністю треба дотримуватися правил зберігання та застосування еталона, які затверджені в установленому порядку. Державний первинний еталон застосовують для передавання розмірів одиниць твердості за шкалами Брінелля і Віккерса робочим еталонам (мірам твердості) 1-го розряду методом опосередкованих вимірювань.

2.2.2 Робочі еталони 1-го та 2-го розряду твердості за шкалами Брінелля та Віккерса.

Як робочі еталони 1-го розряду застосовують набори мір твердості змінного складу типу МТБ (за шкалою Брінелля) і типу МТВ (за шкалою Віккерса), у яких кожна міра має одне постійне значення твердості.

Середні квадратичні відхилення S_e результату перевірки робочих еталонів 1-го розряду становлять за шкалами Брінелля від 0,2 % до 0,4 %; за шкалами Віккерса від 0,15 % до 0,25 %.

Робочі еталони 1-го розряду застосовують для передавання розміру одиниць твердості за шкалами Брінелля і Віккерса робочим еталонам 2-го розряду методом звіряння за допомогою компаратора (приладу, налагодженого за мірами твердості 1-го розряду).

Як робочі еталони 2-го розряду застосовують набори мір твердості змінного складу типу МТБ (за шкалами Брінелля) і типу МТВ (за шкалами Віккерса), у яких кожна міра має одне постійне значення твердості.

Середні квадратичні відхилення S_B результату перевірки робочих еталонів 2-го розряду становлять за шкалами Брінелля від 0,7 % до 1,0 %; за шкалами Віккерса від 0,3 % до 0,8 %.

Робочі еталони 2-го розряду застосовують для перевірки робочих засобів виміральної техніки методом прямих вимірювань.

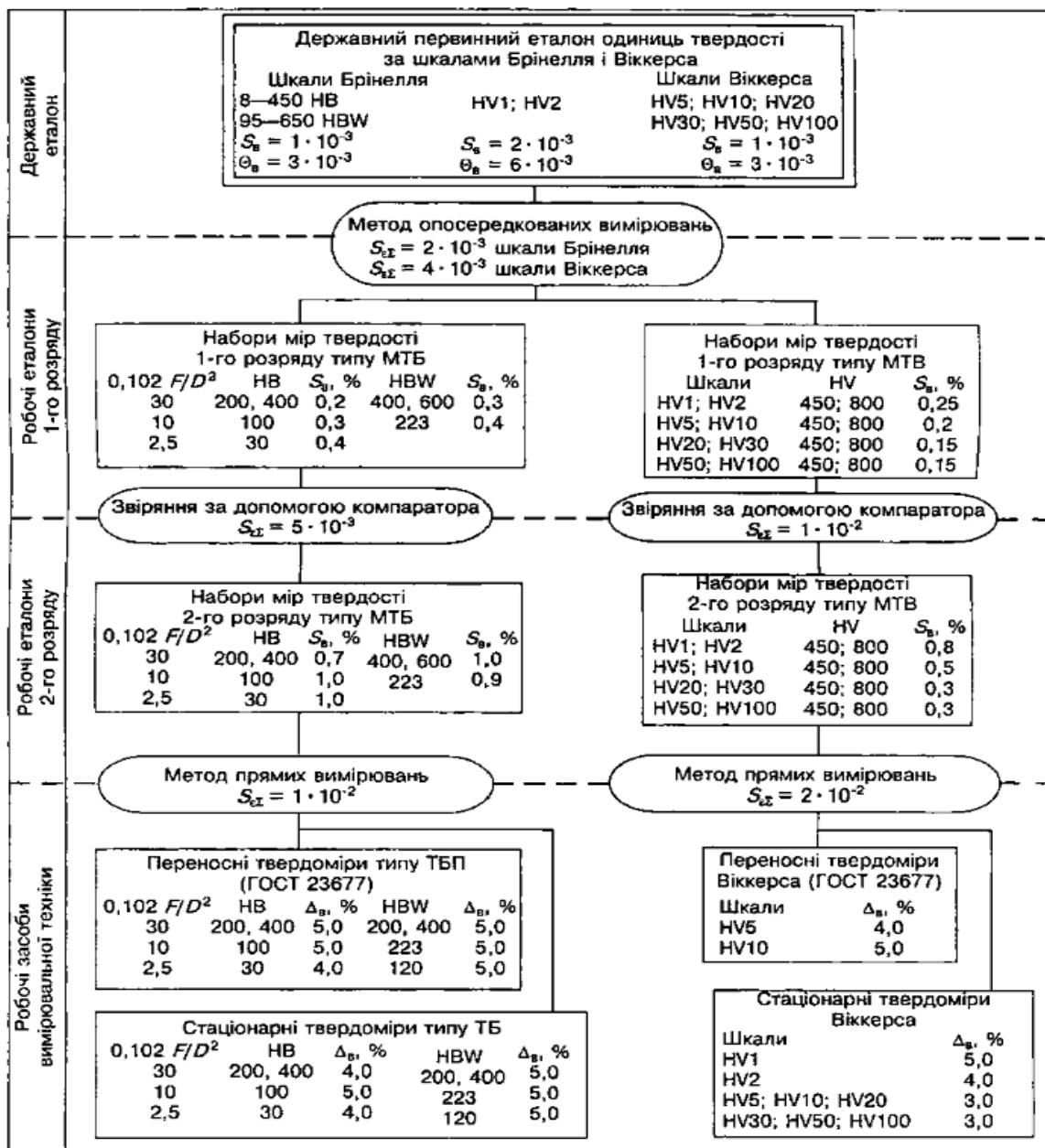


Рисунок 2.10 - Державна повірочна схема для засобів вимірювань твердості за шкалами Брінелля і Віккерса .

де S — середнє квадратичне відхилення результату звірянь; F - сила втискування; D — діаметр кульки, мм

2.3 Національний (державний первинний) еталон одиниць твердості за шкалами Роквелла та Супер-Роквелла

Еталон одиниць твердості за шкалами Роквелла та Супер-Роквелла (рис. 2.11) призначений для Відтворення одиниці твердості за шкалами Роквелла і Супер-Роквелла та передача робочим еталонам (мірам твердості) 1-го розряду методом непрямих вимірювань відповідно до ДСТУ 3869-99 [4].



Рисунок 2.11- Державна первинний еталон для засобів вимірювань твердості за шкалами Роквелла і Супер-Роквелла

2.3.1 Комплекс засобів вимірювальної техніки з якого складається державний первинний еталон вимірювань твердості за шкалами Роквелла і Супер-Роквелла та метрологічні характеристики ЗВТ.

До складу входить:

- стаціонарний прилад безпосереднього навантаження з набором спеціальних гир;
- мікроскоп з номінальною ціною поділки 0,28 мкм для вимірювань глибини відбитків;
- індентори — алмазний конус з кутом при вершині 120° і радіусом закруглення 0,2 мм;
- індентор — сталева заготована кулька діаметром 1,588 мм.

Державний первинний еталон забезпечує відтворення одиниць твердості:

за шкалами Роквелла з середнім квадратичним відхиленням результату вимірювань S , що не перевищує 0,08 HR при 10 незалежних спостереженнях. Невилучена систематична похибка не повинна перевищувати 0,25 HR

за шкалами Супер-Роквелла із середнім квадратичним відхиленням результату вимірювань S , що не перевищує 0,16 HR при 10 незалежних спостереженнях. Невилучена систематична похибка не повинна перевищувати 0,5 HR.

Для забезпечення відтворення одиниць твердості за шкалами Роквелла і Супер-Роквелла із зазначеною точністю треба дотримуватися правил зберігання та застосування еталона, які затверджені в установленому порядку.

Державний первинний еталон застосовують для передавання розміру одиниць твердості за шкалами Роквелла і Супер-Роквелла робочим еталонам (мірам твердості) 1-го розряду методом опосередкованих вимірювань.

2.3.2 Робочі еталони 1-го та 2-го розряду твердості за шкалами Роквелла і Супер-Роквелла.

Робочі еталони 1-го розряду застосовують набори мір твердості змінного складу типу МТР (за шкалами Роквелла) і типу МТСР (за шкалами Супер-Роквелла), у яких кожна міра має одне постійне значення твердості.

Середні квадратичні відхилення S результату повірки робочих еталонів 1 -го розряду становлять від 0,15 HR до 0,50 HR.

Робочі еталони 1 -го розряду застосовують для передавання розміру одиниць твердості за шкалами Роквелла і Супер-Роквелла робочим еталонам 2-го розряду методом звіряння за допомогою компаратора (приладу, налагодженого за мірами твердості 1 -го розряду) [12].

Середні квадратичні відхилення результатів звірянь S_a робочих еталонів з державним еталоном не повинні перевищувати 0,2 за шкалою Роквелла і 0,4 за шкалою Супер-Роквелла.

Робочі еталони 2 -го розряду застосовують набори мір твердості змінного складу типу МТР (за шкалами Роквелла) і типу МТСР (за шкалами Супер-Роквелла), у яких кожна міра має одне постійне значення твердості.

Середні квадратичні відхилення S результату повірки робочих еталонів 2 -го розряду становлять від 0,3 HR до 1,2 HR.

Робочі еталони 2 -го розряду застосовують для повірки робочих засобів вимірювальної техніки методом прямих вимірювань.

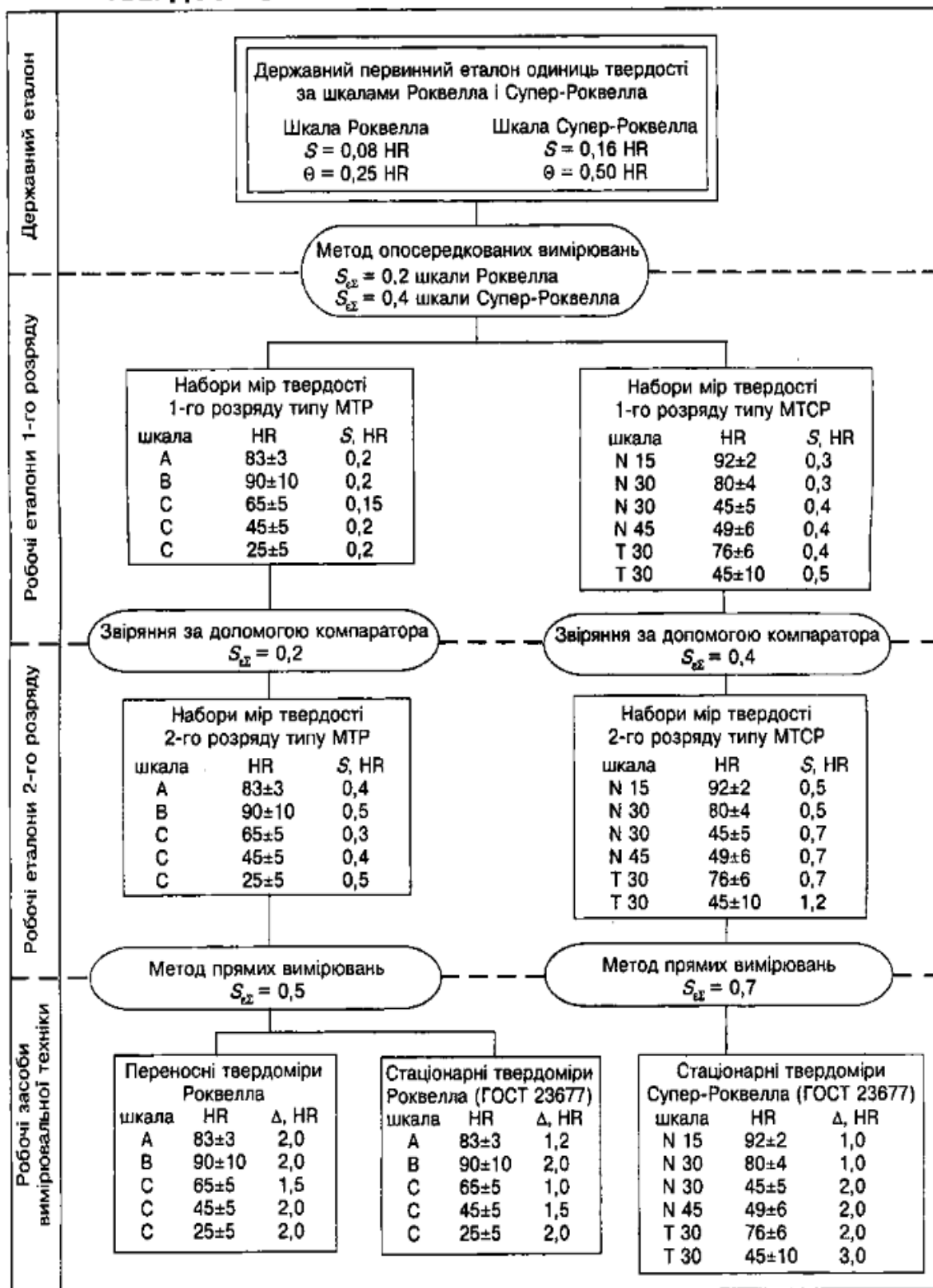


Рисунок 2.12 - Державна повірочна схема для засобів вимірювань твердості за шкалами Роквелла і Супер-Роквелла.

де S — середнє квадратичне відхилення результату звірянь.

2.4 Первинний еталон шкал твердості Ліба.

Система вимірювання швидкості з котушкою індуктивності, що є первинним еталоном Німеччини (рис. 2.13), реалізована в еталонній установці, розробленій на базі твердоміра Equotip 3 [15]. У системі використовується котушка індуктивності та ударник з постійним магнітом у корпусі, аналогічний засобам вимірювань швейцарського виробника Ргосеґ, яких ударник із вбудованим магнітом, пролітаючи крізь котушку індуктивності при падінні, наводить в ній ЕРС амплітудою E_A , яка пропорційна v_a . При відскоку, рухаючись через котушку нагору, ударник наводить у ній ЕРС амплітудою E_R , яка пропорційна v_R .



Рисунок 2.13 – Первинний еталон шкал твердості Ліба у Physikalisch-Technische Bundesanstalt (РТВ), Німеччина

Принцип роботи цієї системи схожий на принцип роботи портативних вимірювальних перетворювачів, що дозволяє знизити

невизначеність результатів вимірювань при передачі одиниці твердості від еталонної установки до робочого засобу вимірювання. Для калібрування системи з однією котушкою індуктивності проводиться поелементне калібрування, в тому числі швидкості удару. Такий підхід не дозволяє проводити періодичний контроль швидкості удару та контроль швидкості під час вимірювань.

Діапазон вимірювання складає 120 – 990 HLD, можливість зміни шкал твердості HRB, HRC, HV, HB, HS (рис. 2.14).

Матеріал	Перетворення діапазонів						
	HL	HRC	HRB	HB		HS	HV
				30D ²	10D ²		
Сталь та Чавун	300 ~ 900	200~68,0	38,4~99,5	80 ~ 647		32,5 ~ 99,5	80 ~ 940
СWTool сталь	300 ~ 840	20,4~67,1					80 ~ 898
Нержавіюча сталь	300 ~ 800	19,6~62,4	46,5~101,7	85 ~ 655			80 ~ 802
Сірий чавун	360 ~ 650			93 ~ 334			
Вузликотий чавун	400 ~ 660			131 ~ 387			
Литий алюміній	174 ~ 560				20 ~ 159		
Латунь	200 ~ 550		13,5~95,3		40 ~ 173		
Бронза	300 ~ 700				60 ~ 290		
Мідь	200 ~ 690				45 ~ 315		

Рисунок 2.14 - Матеріали, які вимірює первинний еталон шкал твердості Ліба у Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Німеччина.

2.5 Проект повірочної схеми вимірювання твердості за методом Ліба.

Державний первинний Еталон (ДПЕ)	ДПЕ твердості по методу Ліба		Метод прямих вимірювань
	Метод прямих вимірювань		
Еталони 1-го розряду	Еталон та міри 1-го розряду $V_H = \pm 0,5\%$		Метод прямих вимірювань
	Метод прямих вимірювань		
Еталони 2-го розряду	Еталонні установки 2-го розряду $W_H = \pm 1\%$ $\pm 2,0 (HL < 500)$ $G_H, \% = \pm 1,5 (HL = 500 - 700)$ $\pm 1,0 (HL > 700)$		Поелементна калібровка $V_A = (2,05 \pm 0.0025)$ $m = (5,45 \pm 0.03)$ $R = (1,5 \pm 0.003)$
	Метод прямих вимірювань		
	Міри еталону 2-го розряду $\pm 2,0 (HL < 500)$ $V_H, \% = \pm 1,5 (HL = 500 - 700)$ $\pm 1,0 (HL > 700)$		
Робочі засоби вимірювання	Метод прямих вимірювань		Поелементна калібровка $V_A = (2,05 \pm 0.1)$ $m = (5,45 \pm 0.5)$ $R = (1,5 \pm 0.005)$
	Твердоміри Ліба		
		$V, \%$	
	$HL < 500$	2,5	$\pm 2,0$
	$HL = 500 - 700$	2,0	$\pm 3,0$
	$HL > 700$	1,5	$\pm 1,0$
Достовірні результати вимірювання			

Метрологічних характеристик для проекту повірочної схеми вимірювання встановлені міжнародними стандартами. У (табл. 2.1) наведено значення метрологічних характеристик еталонів та SI твердості за шкалою Ліба [17].

Таблиця 2.1 – Метрологічні характеристики еталонів та SI твердості за методом Ліба.

Міри твердості 1-го розряду		
Діапазон твердості по Лібу, HL	Максимальний коефіцієнт варіації $V_H, \%$	
< 500	$\pm 0,5$	
500-700	$\pm 0,5$	
> 700	$\pm 0,5$	
Еталонні установки 2-го розряду		
Діапазон твердості по Лібу, HL	Мінімальна повторюваність $W_H, \%$	Максимальна допустима похибка $G_H, \%$
< 500	1,0	$\pm 2,0$
500-700	1,0	$\pm 1,5$
> 700	1,0	$\pm 1,0$
Міри твердості 2-го розряду		
Діапазон твердості по Лібу, HL	Максимальний коефіцієнт варіації $V_H, \%$	
< 500	$\pm 2,0$	
500-700	$\pm 1,5$	
> 700	$\pm 1,0$	
Твердоміри		

Продовження таблиці 2.1

Твердоміри		
	Коефіцієнт варіації твердоміра $V, \%$	Максимально допустима похибка $E_{rel}, \%$
< 500	$\pm 2,5$	$\pm 4,0$
500-700	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$
> 700	$\pm 1,5$	$\pm 2,0$

2.6 Висновки за розділом 2.

1. Розглянуто особливості методу вимірювання твердості за шкалами

Ліба та основи забезпечення єдності вимірів твердості за шкалами Ліба;

2. Встановлено, що для забезпечення єдності вимірів твердості шкалам Ліба необхідно нормувати (встановити номінальні значення та гранично допустимі відхилення) та контролювати наступні параметри первинних перетворювачів: швидкість удару, масу ударника, радіус наконечника, а також фізико-механічні властивості матеріалу сферичного наконечника.

3. Проаналізовано метрологічні характеристики еталонів та засобів вимірювань твердості.

4. Запропоновано проект повірочної схеми вимірювання твердості за методом Ліба, що відповідає міжнародним стандартам та схемам вже прийнятих еталонів в Україні.

РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ІЄРАРХІЧНОЇ СХЕМИ ПЕРЕДАЧІ ОДИНИЦІ ТВЕРДОСТІ ЗА ШКАЛОЮ ЛІБА ТА МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАНЬ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПРОТОТИПУ ЕТАЛОННОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Встановлення вимог з метою забезпечення єдності вимірів твердості за методом Ліба

В даний час вимоги до метрологічних характеристик засобів вимірювання за Лібом регламентовані низкою міжнародних стандартів, що описують метод вимірювання твердості за Лібом. Зокрема, стандарт встановлює як вимоги, які пред'являються до технічних параметрів вимірювальних перетворювачів при поелементній перевірці (калібруванні), так і вимоги до результатів повірки (калібрування) з використанням еталонних заходів твердості [18].

Зокрема, для забезпечення повторюваності результатів вимірювань необхідне дотримання вимог до наступних параметрів:

- Швидкості удару v_A ;
- Максимальній відстані від сферичного наконечника до поверхні зразка при вимірі швидкості;
- Масі ударника (включаючи наконечник) m ;
- Радіусу сферичного наконечника R ;
- Матеріалу наконечника;
- Твердості наконечника за шкалою Віккерса HV;
- Мінімальний виступ сферичної поверхні наконечника щодо власника наконечника

Встановлені до робочих засобів вимірювань твердості вимоги задовольняють потреби промислових підприємств під час контролю твердості у виробничих умовах.

З метою досягнення заданої стандартом точності вимірювань та забезпечення простежуваності результатів вимірювань ISO 16859-1_2015 [7], пропонується наступна структура забезпечення простежуваності для визначення та поширення шкал твердості Ліба, (рис. 3.1)

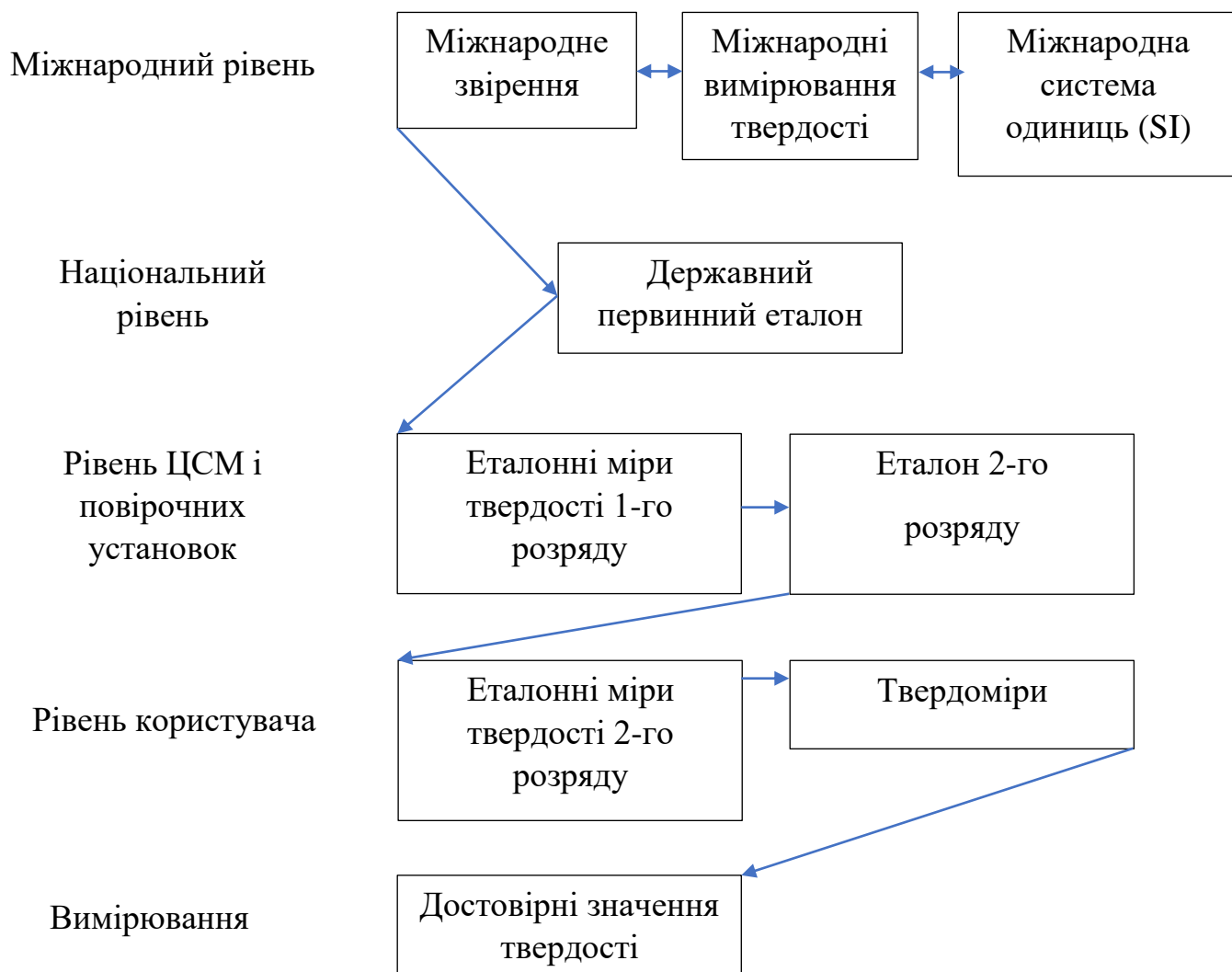


Рисунок 3.1 - Загальна структура забезпечення простежуваності (метрологічного ланцюга) для визначення та поширення шкал твердості Ліба.

3.2 Характеристики еталонних мір твердості

Еталонні заходи твердості 1-го та 2-го розряду поділяються на три діапазони [< 500 HLD], [$500 - 700$ HLD], [> 700 HLD] і, відповідно до вимог стандарту, повинні відповідати встановленим вимогам на однорідність, що характеризується коефіцієнтом v_H .

Коефіцієнт варіації є статистичним і характеризує відхилення вимірних значень твердості від середньоарифметичного. Значення твердості за Лібом, отримані в результаті вимірювань на робочій поверхні міри.

Коефіцієнт варіації розраховується за формулою:

$$V_H = \frac{S_n}{H} * 100\%, \quad ($$

3.1)

де S_n – стандартне відхилення, що визначається за формулою:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_1^{10} (H_i - H)^2}{n-1}}, \quad ($$

3.2)

де H - середнє арифметичне значення твердості.

Максимальний коефіцієнт варіації для твердості 1-го розряду для ударних твердомірві типу D не повинен перевищувати 0,5 % у всьому діапазоні значень.

3.2.1 Вимоги до максимального коефіцієнта варіації для мір твердості 1-го розряду.

Вимоги до максимального коефіцієнта варіації для мір твердості 1-го розряду для ударних перетворювачів типу D наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Діапазони та максимальний коефіцієнт варіації для еталонних заходів твердості 1-го розряду

Діапазони твердості, HLD	Максимальний коефіцієнт варіації $V_H, \%$
< 500	$\pm 0,5$
500 – 700	$\pm 0,5$
> 700	$\pm 0,5$

3.2.2 Вимоги до еталонних установок 2-го розряду при повірці по еталонним мірам твердості 1-го розряду.

При повірці за еталонними заходами твердості робочі еталонні установки повинні задовольняти вимоги щодо мінімальної повторюваності W_H та максимальній допустимій помилці G_H . На кожній еталонній мірі твердості проводиться щонайменше 10 одиничних вимірів.

При перевірці за еталонними заходами твердості вимоги до граничного відхилення твердості за Лібом задоволені, коли виконується умова:

$$G_H \geq |b_H(H)| + u_{CRM}, \quad (3.3)$$

де G_H - максимально допустима похибка;

де u_{CRM} , - невизначеність еталонної міри твердості на основі свідоцтва про повірку при $k = 1$;

де b_H - похибка твердості за Лібом, що визначається за формулою:

$$b_H = \frac{1}{n} \sum_1^n H_i - H_{CRM}, \quad (3.4)$$

де H_{CRM} - значення твердості за Лібом еталонної міри твердості на основі свідоцтва про повірку.

Де H_i - одиничний вимір твердості по Лібу.

Таблиця 3.2 – Вимоги до параметрів еталонної установки твердості за Лібом 2-го розряду.

Параметр	Од. вимірювання	Значення
Швидкість удару	м/с	2,05± 0,0025
Маса ударника m	Г	5,45 ± 0,03
Радіус сферичного наконечника R	мм	1,500 ± 0,003
Твердість наконечника за Віккерсом	HV2	1600 ± 50

3.2.3 Вимоги до робочих засобів вимірювань.

При повірці за еталонними заходами твердості робочі засоби вимірювань повинні задовольняти вимоги щодо коефіцієнта варіації V_H і відносної гранично допустимої похибки E_{rel}

Коефіцієнт варіації розраховується за формулою:

$$V = \frac{s(H)}{\bar{H}} * 100\%, \quad (3.5)$$

де $s(H)$ – стандартне відхилення для $n = 10$ результатів вимірювань твердості по Лібу розраховується за формулою:

$$s(H) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n-1}}, \quad (3.6)$$

Середнє арифметичне значення \bar{H} для $n = 10$ результатів вимірювань розраховується за формулою:

$$\bar{H} = \frac{H_1 + H_2 + \dots + H_n}{n}, \quad (3.7)$$

де $H_1 + H_2 + \dots + H_n$ – результати вимірювань твердості по Лібу;

n – кількість вимірювань.

Похибка твердоміра визначається за формулою:

$$E = \bar{H} - H_{CRM}, \quad (3.8)$$

де H_{CRM} – середнє значення еталонної міри твердості на основі свідоцтва про повірку (сертифікату калібрування).

Максимально допустима похибка твердоміра розраховується за формулою:

$$E_{rel} = \frac{\bar{H} - H_{CRM}}{H_{CRM}} * 100\% \quad (3.9)$$

Вимоги до технічних параметрів робочих засобів вимірювання твердості представлені в таблиці 3.3

Таблиця 3.3 - Вимоги для робочих засобів вимірювання

Позначення	Од. вимірювання	Найменування	Значення
v_A	м/с	Швидкість удару	$2,05 \pm 0,10$
h	мм	Максимальна відстань наконечника до поверхні вимірювання	2,00
m	г	Маса ударника	$5,45 \pm 0,5$
R	мм	Радіус наконечника	$1,5 \pm 0,005$
HV	HV10	Твердість наконечника по шкалі Віккерса	1600 ± 100

Позначення	Од. вимірювання	Найменування	Значення
dx	мм	Мінімальний відступ наконечника відносно тримача наконечника	0,3

Продовження таблиця 3.3

3.3 Метрологічний аналіз методів вимірювань для створення прототипу еталонної установки.

Згідно із запропонованим проектом ієрархічної схеми передачі одиниці твердості еталон твердості по Лібу включає в себе стаціонарний прилад, що відтворює шкалу Ліба, із заданими технічними та метрологічними характеристиками та комплект засобів вимірювань для контролю його параметрів. Для розробки прототипу еталонної установки необхідно проаналізувати варіанти реалізації схем розгону ударника та вимірювання його швидкості [19].

3.3.1 Аналіз ударного перетворювача з пружинним механізмом розгону ударника.

В даний час у всіх робочих засобах вимірювання твердості за шкалами Ліба для розгону ударника використовуються пружинні механізми розгону. При цьому для дотримання вимог швидкості удару необхідно проведення розрахунку жорсткості пружини. Для розрахунку використовується модель, в якій пружина з жорсткістю перед розгоном

ударника стиснута на величину S_0 . Зусилля пружини F_0 , що штовхає, змінюється в міру розгону ударника пропорційно зміні ходу пружини згідно з формулою:

$$F = C_S S_0 - C_S S = C_S (S_0 - S). \quad (3.10)$$

У процесі розгону із прискоренням a зусилля пружини рівноважуються масою ударника згідно з формулою:

$$F = m(a + g), \quad (3.11)$$

Переміщення ударника S на цій ділянці описується рівнянням:

$$m \left(\frac{d^2 S}{dt^2} + g \right) = C_S (S_0 - S). \quad (3.12)$$

Рішення цього рівняння має вигляд виразу:

$$S(t) = \left(S_0 - \frac{mg}{C_S} \right) \left(1 - \cos \sqrt{\frac{C_S}{m}} t \right) * 1(t) \quad (3.13)$$

Швидкість ударника на цьому етапі знаходиться за допомогою рівняння:

$$V_S(t) = \frac{dS}{dt} = \left(S_0 - \frac{mg}{C_S} \right) \sqrt{\frac{C_S}{m}} \sin \left(\frac{C_S}{m} t \right) * 1(t) \quad (3.14)$$

Кінцева швидкість розгону ударника відповідає виразу:

$$V_S = S_0 \sqrt{\frac{C_S}{m}} - g \sqrt{\frac{m}{C_S}}. \quad (3.15)$$

3.3.2 Оцінка впливу висоти скидання

Якщо брати за основу регіон Івано-Франківськ с прискоренням вільного падіння $g = 9.80888 \text{ м/с}^2$ номінальна висота скиду ударника H_1 описується виразом:

Похибка V_A від зміни висоти скиду ударника H_1 описується формулою:

$$V_A = (\Delta H_1) = \frac{dV_A}{dH_1} \Delta H_1 = \sqrt{\frac{g}{2H_1}} * \Delta H_1 \quad (3.16)$$

3.3.3 Оцінка впливу кута нахилу

Розглянемо вплив позиціонування еталонної установки. Якщо вісь напрямної трубки встановлена з відхиленням від вертикальної осі, вектор прискорення вільного падіння діє на ударник пропорційно косинусу кута відхилення. Направляюча трубка встановлюється за допомогою електронного рівня, похибка вимірів якого дорівнює $0,1^\circ$. Похибка завдання позиціонування еталонної установки, визначається виразом:

$$\Delta V_A(\Delta\varphi) = \frac{dV_A}{d\varphi} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{\cos\varphi g H_1}} \sin\varphi g H_1 * \Delta\varphi \quad (3.17)$$

Таким чином, відхилення положення направляючої трубки щодо вертикальної осі на $0,1^\circ$ призводитиме до систематичної похибки швидкості ударника на $-0,000179 \text{ м/с}$. До того ж збільшуватиметься вплив коефіцієнта тертя ударника об стінки напрямної трубки. Регулювання положення установки у просторі забезпечується з допомогою сферичних регульованих опор.

3.3.4 Оцінка впливу прискорення вільного падіння

Прискорення вільного падіння є константою, значення якої залежить від висоти над рівнем моря та широти розташування. Залежність похибки розрахунку швидкості руху ударника від похибки завдання визначається формулою:

$$\Delta V_A(\Delta g) = \frac{dV_A}{dg} \Delta g = \sqrt{\frac{H_1}{2g}} * \Delta g. \quad (3.18)$$

Для відповідності до міжнародних стандартів забезпечення відхилення швидкості повинне становити не більше 0,0025 м/с.

3.3.5 Аналіз методів вимірювання швидкості ударника

Еталонні установки за шкалами Ліба відрізняються способом вимірювання швидкості ударника. В даний час існують два способи реєстрації швидкості ударника, що падає: з використанням лазерного інтерферометра і котушок індуктивності. Розроблено також системи для поелементного калібрування та перевірки робочих засобів вимірювання твердості [20].

Існуючі системи вимірювання швидкості падаючого ударника на основі лазерного інтерферометра, що має стабілізовану частоту, дозволяють зафіксувати вимірювання швидкості протягом всього процесу падіння та відскоку ударника, однак для більшості існуючих рішень конструкція ударника відрізняється від стандартизованого для забезпечення відображення променя інтерферометра.

Для вимірювання швидкості ударника використовувався лазерний інтерферометр, що ґрунтується на методиці прямого оптичного гетеродинування доплерівських сигналів - PDV (Photonic Doppler Velocimetry). Дана методика точна, проста в реалізації і дозволяє простежити за динамікою об'єкта без використання додаткових елементів, що відбивають. Використання оптоволоконних та широко поширених телекомунікаційних елементів у такій системі дозволяє створити компактний та недорогий прилад, придатний для оснащення ним метрологічних організацій та лабораторій, що проводять калібрування або перевірку динамічних твердомірів, що працюють за методом Ліба, та відповідних заходів твердості.

Розроблена система проводить через оптоволоконний кабель, розгалужувач 2 і циркулятор 5 випромінювання безперервного одночастотного лазера 1 на довжині хвилі 1550 нм до досліджуваного об'єкта. Градієнтна лінза 7 закріплюється на кінці оптоволоконного кабелю. Випромінювання лазера колімується і направляється на об'єкт 8, що рухається. Частина випромінювання лазера через волокно і волоконний змішувач 3 подається на детектор 4. Розсіяне об'єктом випромінювання відчуває доплерівський зсув частоти, після чого частково збирається тією ж лінзою і передається на детектор 4. Після чого, при детектор двох сигналів з різними частотами на фотоприймачі формуються биття, що реєструються осцилографом (рис. 3.2).

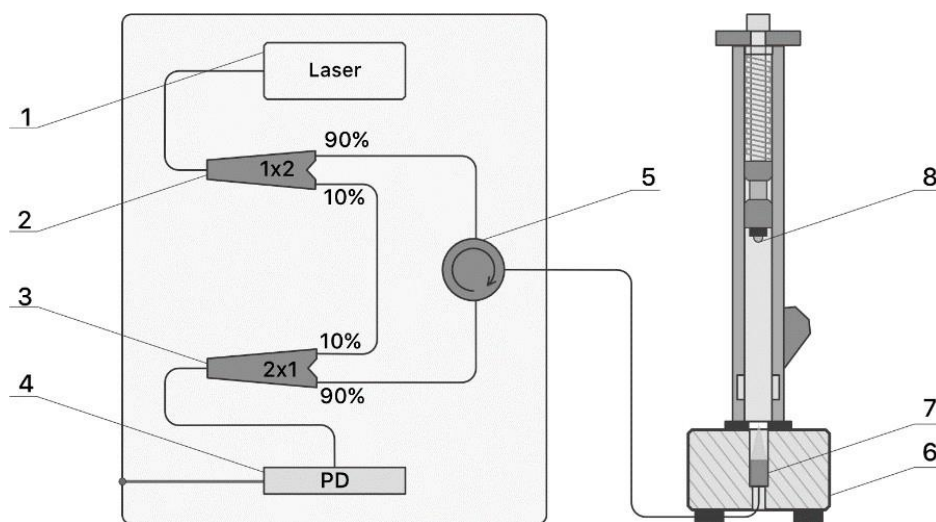


Рисунок 3.2 – Схема інтерферометра для вимірювання швидкості ударника. 1 – джерело лазерного випромінювання, 2 – світлодільник з коефіцієнтом 1/9, 3 – оптоволоконний змішувач, 4 – фотодетектор, 5 – циркулятор, 6 – фіксатор лінзита твердоміра, 7 – градієнтна лінза, 8 – ударник

Швидкість об'єкта пропорційна частоті доплерівського сигналу та описується формулою:

$$V(t) = \frac{2cf_b(t)}{f_0}$$

(3.19)

де f_0 – частота генерації лазера, c – швидкість світла.

Віконне Фур'є перетворення застосовується для відновлення процесу зміни частоти сигналу, що реєструється. Вихідний сигнал розбивається на частини із фіксованим кроком – довжиною вікна. Після Фур'є перетворення з набору частот у кожному вікні з визначається максимальне значення за допомогою апроксимації функцією Гауса, після чого з отриманих точок вибудовується динаміка зміни швидкості протягом усього падіння ударника.

Невизначеності вимірювання часу та частоти, пов'язані віконним Фур'є перетворенням, описуються за допомогою формули:

$$\Delta f \Delta t \geq \frac{1}{4} \pi$$

(3.20)

де Δt – невизначеність вимірювання часу, Δf – невизначеність вимірювання частоти сигналу.

3.4 Висновки за розділом 4

1. Запропоновано загальна структура забезпечення простежуваності (метрологічного ланцюга) для визначення та поширення шкал твердості Ліба.
2. Проведено аналіз та сформульовано вимоги до основних конструктивним елементам та вузлам прототипу еталонної установки 1-го та 2-го розряду та робочих твердомірів;
3. Описано метрологічні оцінки параметрів, які впливають на процес вимірювання твердомірів методу Ліба.

ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі пропонується нове рішення актуального наукового завдання - підвищення точності та достовірності вимірювань твердості за шкалами Ліба в Україні шляхом розробки оригінальних методичних рішень, зокрема, прототипу схеми еталонної установки твердості за шкалою Ліба, а також проекту ієрархічної схеми передачі одиниці твердості за Лібом на чотирьох рівнях.

Виконані дослідження дозволяють створити апаратну методичну і базу для реалізації метрологічної простежуваності результатів вимірювань твердості за шкалами Ліба до первинного зразка та забезпечення єдності вимірів у Україні

На підставі проведених досліджень отримано такі наукові результати:

- На підставі аналізу та дослідження методів та засобів вимірювань твердості за шкалами Ліба була розроблена модель процесу вимірювання твердості за методом Ліба, що враховує впливові величини.
- Розроблено чотирирівневу структуру ієрархічної схеми передачі одиниці твердості за шкалою Ліба (проект перевіркової схеми), що

забезпечує відтворення та передачу шкал твердості за Лібом від первинного зразка засобам вимірювань.

- Сформульовано перелік вимог до еталонних установок 2-го та міра твердості 2-го розряду, відповідно до запропонованого проекту перевіркової схеми та розраховано їх значення.

Список використаних джерел

1. ДСТУ 2825-94 Розрахунки та випробовування на міцність. Терміни та визначення основних понять.
2. ДСТУ ISO 6506-1:2007 (ISO 6506-1:2005, IDT) Матеріали металеві. Визначення твердості за Брінелем. Частина 1. Метод випробування.
3. ДСТУ 3870-99 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань твердості за шкалами Брінелля і Віккерса.
4. ДСТУ 3869-99 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань твердості за шкалами Роквелла і Супер-Роквелла.
5. ISO 6508-1:2023 Metallic materials. Rockwell hardness test.
6. ISO 6507-1:2023 Metallic materials. Vickers hardness test. Part 1: Test method
7. ISO 16859-1_2015 Metallic materials. Leeb hardness test
8. ASTM E 448-82. Standard Practice for Scleroscope Hardness Testing of Metallic Materials, 2008.
9. Cohen, L. Time-Frequency Analysis / L. Cohen // Prentice Hall PTR (1995) 300.
10. 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.
11. Formisano, A. Leeb hardness experimental tests on carpentry steels: Surface treatment effect and empirical correlation with strength / A. Formisano, G. Chiumiento, G. Di Lorenzo // AIP Conf. Proc. 1978, (2018).
12. ДСТУ ISO 10012:2005 (ISO 10012:2003, IDT) Національний стандарт України. Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання.
13. ДСТУ ISO 31000:2014 Менеджмент ризиків. Принципи та керівні вказівки (ISO 31000:2009, IDT)
14. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT) Національний стандарт України. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризиків.
15. ISO 18265:2013 Metallic materials. Conversion of hardness values. 2013.

16. ISO/DIS 16859-1. Metallic materials - Leeb hardness test - Part 1: Test method, 2015.
17. ISO/DIS 16859-2. Metallic materials - Leeb hardness test - Part 2: Verification and calibration of the testing devices, 2015.
18. ISO/DIS 16859-3. Metallic materials - Leeb hardness test - Part 3: Calibration of reference test blocks, 2015.
19. Koepfel, B.J. Dynamic Indentation Hardness of Metals / B.J. Koepfel, G. Subhash // IUTAM Symposium on Micro- and Macrostructural Aspects of Thermoplasticity. Solid Mechanics and its Applications, vol 62. Springer, Dordrecht (1999).
20. Kompatscher, M. Dynamic Hardness Measurements / M. Kompatscher // MAPAN - Journal of Metrology Society of India, Vol. 20, №1, 2005, pp. 25-36.
21. 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, i Leeb Hardness. 2019.