

**Міністерство освіти і науки України**  
**Луцький національний технічний університет**  
**Факультет робототехніки та штучного інтелекту**  
**Кафедра автоматизації та безпілотних систем**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**ТВЕРДОМІР ТШ-ISO-2 ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТВЕРДОСТІ**  
**ГУМОВИХ ЗРАЗКІВ ЗА МІЖНАРОДНИМИ СТАНДАРТАМИ**

**HARDNESS TESTER TSH-ISO-2 FOR CONTROLLING THE**  
**HARDNESS OF RUBBER SAMPLES ACCORDING TO**  
**INTERNATIONAL STANDARDS**

спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка  
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Мікро- та наносистемна техніка»  
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи МНТ-41  
**ВАВИЛЮК Сергій Миколайович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник:  
К.т.н., доцент  
**ДЕНИСЮК Віктор Юрійович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«    » \_\_\_\_\_ 2026 р.  
К.т.н., доцент  
Гарант освітньої програми:  
**ПТАШЕНЧУК Віталій Віталійович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2026 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 15 Автоматизація та приладобудування

Спеціальність: 153 Мікро- та наносистемна техніка

Освітня програма: «Мікро- та наносистемна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

д.т.н., професор Повстяной О. Ю.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

*Вавилюку Сергію Миколайовичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи *Твердомір ТШ-ISO-2 для контролю твердості гумових зразків за міжнародними стандартами*

Керівник роботи: *к.т.н., доцент Денисюк Віктор Юрійович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «31» грудня 2025 р. № 307/01-04

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «25» травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *Напруга мережі змінного струму 220 В, частота 50 Гц. Діаметр кульки індентора  $2,50 \pm 0,01$  мм. Зовнішній діаметр притискної лапки  $20 \pm 1$  мм. Внутрішній діаметр притискної лапки  $6 \pm 1$  мм. Діапазон вимірювання IRHD під час реалізації методики ГОСТ 20403 – 30-99; ISO 48 – 30-95. Навантаження на кульку індентора: попереднє –  $0,30 \pm 0,02$  Н; основне –  $5,40 \pm 0,01$  Н; загальне –  $5,70 \pm 0,03$  Н. Навантаження на притискную лапку –  $8,3 \pm 1,5$  Н.*

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

*Анотація. Вступ. 1. Загальнотехнічна частина. 2. Розрахунково-конструкторська частина.*

*3. Спеціальна частина. Висновки. Список використаних джерел.*

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

*1. Загальний вигляд твердоміра ТШ-ISO-2 для контролю твердості гумових зразків за міжнародними стандартами (1 лист формату А1). 2. Електрична структурна схема твердоміра ТШ-ISO-2 для контролю твердості гумових зразків за міжнародними стандартами (1 лист формату А1). 3. Кінематична функціональна схема твердоміра ТШ-ISO-2 для контролю твердості гумових зразків за міжнародними стандартами (1 лист формату А1). 4. Складальне креслення давача індуктивного (1 лист формату А1) 5. Робочі креслення деталей (1 лист формату А1).*

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1 Загальнотехнічна частина</i>	<i>Денисюк В. Ю.</i>		
<i>Розділ 2 Розрахунково-конструкторська частина</i>	<i>Денисюк В. Ю.</i>		
<i>Розділ 3 Спеціальна частина</i>	<i>Денисюк В. Ю.</i>		
<i>Висновки</i>	<i>Денисюк В. Ю.</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Лапченко Ю. С.</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Пташенчук В. В.</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>		<b>3,19 %</b>	
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Лапченко Ю. С.</i>		

7. Дата видачі завдання «08» січня 2026 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Обґрунтування теми</i>	До 20.01.2026 р.	
2.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	До 25.01.2026 р.	
3.	<i>Розділ 1 Загальнотехнічна частина</i>	До 01.02.2026 р.	
4.	<i>Розділ 2 Розрахунково-конструкторська частина</i>	До 15.02.2026 р.	
5.	<i>Розділ 3 Спеціальна частина</i>	До 25.02.2026 р.	
6.	<i>Висновки</i>	До 10.03.2026 р.	
7.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	До 20.03.2026 р.	
8.	<i>Креслення загального вигляду твердоміра ТШ-ISO-2</i>	До 01.04.2026 р.	
9.	<i>Креслення електричної структурної схеми твердоміра ТШ-ISO-2</i>	До 10.04.2026 р.	
10.	<i>Креслення кінематичної функціональної схеми твердоміра ТШ-ISO-2</i>	До 20.04.2026 р.	
11.	<i>Складальне креслення давача індуктивного</i>	До 01.05.2026 р.	
12.	<i>Робочі креслення деталей</i>	До 05.05.2026 р.	
13.	<i>Формування додатків (специфікації)</i>	До 10.05.2026 р.	
14.	<i>Нормоконтроль</i>	До 15.05.2026 р.	
15.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	До 20.05.2026 р.	
16.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	До 25.05.2026 р.	

Здобувач вищої освіти

\_\_\_\_\_ (Вавилюк С. М.)  
 (підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_ (Денисюк В. Ю.)  
 (підпис) (прізвище, ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Вавилюк С. М. Твердомір ТШ-ISO-2 для контролю твердості гумових зразків за міжнародними стандартами. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Мікро- та наносистемна техніка» спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026. Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню конструктивних, метрологічних та експлуатаційних особливостей твердоміра ТШ-ISO-2, призначеного для визначення твердості еластомерних матеріалів за міжнародним методом IRHD.

У загальнотехнічній частині описано технічну характеристику та службове призначення твердоміра ТШ-ISO-2. Проведено аналіз існуючих аналогів, описано принцип роботи та фізичні перетворення, які покладено в основу роботи твердоміра для контролю твердості гумових зразків за міжнародними стандартами. У розрахунково-конструкторській частині описано будову і принцип роботи твердоміра, його кінематичну та структурну схеми; проведено розрахунок електронного блоку; підготовка та порядок роботи з твердоміром. У спеціальній частині представлено методику перевірки твердоміра, проведення його випробувань, можливі несправності твердоміра та шляхи їх усунення.

Ключові слова: твердомір, твердість гум, індентор з кулькою, гумовий зразок, індуктивний давач, метрологічні характеристики, перевірка, вимірювання.

					ВР 509.00.00.000 ПЗ			
Вим.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробив	Вавилюк				Твердомір ТШ-ISO-2 для контролю твердості гумових зразків за міжнародними стандартами	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірів	Денисюк					н	4	68
Н. Контр.	Лапченко					ЛНТУ, кафедра АтаБС, гр. МНТ – 41		
Затвердив	Гуменюк							

## ANNOTATION

Vavylyuk S. Hardness tester TSh-ISO-2 for controlling the hardness of rubber samples according to international standards. Manuscript.

Bachelor's qualification work OP «Micro- and nanosystems technology» specialty 153 Micro- and nanosystems technology. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026. Bachelor's qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of used sources, appendices.

The qualification work is devoted to the study of the design, metrological and operational features of the hardness tester TSh-ISO-2, designed to determine the hardness of elastomer materials according to the international IRHD method.

The general technical part describes the technical characteristics and service purpose of the hardness tester TSh-ISO-2. An analysis of existing analogues is carried out, the principle of operation and physical transformations that are the basis for the operation of the hardness tester for controlling the hardness of rubber samples according to international standards are described. The design and calculation part describes the structure and principle of operation of the hardness tester, its kinematic and structural diagrams; the calculation of the electronic unit; preparation and procedure for working with the hardness tester. The special part presents the method of verifying the hardness tester, conducting its tests, possible malfunctions of the hardness tester and ways to eliminate them.

Keywords: hardness tester, rubber hardness, indenter with a ball, rubber sample, inductive sensor, metrological characteristics, verification, measurement.

					BP 509.00.00.000. ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА.....	10
1.1 Технічна характеристика та службове призначення твердоміра ТШ-ISO-2 .....	10
1.2 Аналіз існуючих аналогів, критичний огляд інформаційних джерел .....	12
1.3 Фізичні перетворення, які використовуються в твердомірі .....	21
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	30
2.1 Будова і принцип роботи твердоміра ТШ-ISO-2 .....	30
2.2 Кінематична схема твердоміра ТШ-ISO-2.....	32
2.3 Структурна схема твердоміра ТШ-ISO-2 .....	35
2.4 Конструкція та принцип роботи індуктивного давача твердоміра ТШ-ISO-2 .....	38
2.5 Розрахунок електронного блоку твердоміра ТШ-ISO-2 .....	43
2.6 Підготовка та порядок роботи з твердоміром .....	47
РОЗДІЛ 3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	51
3.1 Особливості повірки твердоміра.....	51
3.2 Проведення випробувань твердоміра.....	54
3.3 Можливі несправності твердоміра та шляхи їх усунення .....	62
ВИСНОВКИ .....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	66
ДОДАТКИ.....	68

## ВСТУП

Твердість є однією з основних фізико-механічних характеристик матеріалів і визначається як їх здатність чинити опір проникненню в поверхню більш твердого тіла – індентора. Дана властивість широко використовується для оцінювання експлуатаційних характеристик матеріалів, контролю якості виробів та аналізу змін їх стану під впливом зовнішніх чинників. Залежно від величини прикладеного навантаження та глибини впровадження індентора розрізняють три основні діапазони вимірювання твердості: макро-, мікро- та нанодіапазон. Макродіапазон охоплює навантаження від 2 Н до 30 кН і застосовується для дослідження масивних зразків. Мікродіапазон передбачає навантаження до 2 Н при глибині впровадження індентора понад 0,2 мкм. У нанодіапазоні основним параметром є глибина проникнення індентора, яка не перевищує 0,2 мкм, що дозволяє досліджувати тонкі поверхневі шари матеріалів.

Для практичної реалізації методів вимірювання твердості застосовують спеціалізовані вимірювальні прилади – твердоміри. Вимірювання твердості належить до універсальних, переважно неруйнівних методів контролю, що знайшли широке застосування у виробництві, наукових дослідженнях та експлуатаційному контролі. Зокрема, твердоміри використовуються для контролю якості матеріалів і виробів, оцінювання результатів термічної обробки, аналізу процесів старіння матеріалів, а також для порівняльного аналізу однотипних матеріалів.

Одним із поширених методів оцінювання твердості еластомерів є метод Шора, який реалізується у двох основних варіантах: методом відскоку (склероскопічний метод) та методом вдавлювання. Метод вдавлювання реалізується за допомогою дюрометрів (твердомірів Шора) і базується на вимірюванні глибини проникнення індентора у досліджуваний матеріал. Для різних груп матеріалів застосовуються відповідні шкали – А, D, С тощо,

значення яких знаходяться в межах від 0 до 100, де більші числові значення відповідають більш жорстким матеріалам.

Дюрметри широко використовуються для вимірювання твердості полімерних матеріалів, пластмас, гум, каучуків та виробів на їх основі. Для аналізу твердості більш жорстких матеріалів, зокрема металів, застосовують методи відскоку. Сучасні твердоміри дозволяють здійснювати вимірювання як на зразках, так і безпосередньо на готових виробках, у тому числі на поверхнях складної геометричної форми. Залежно від принципу дії такі прилади можуть реалізовувати як руйнівні, так і неруйнівні методи контролю.

Твердомір ТШ-ISO-2 призначений для вимірювання та контролю твердості гумових зразків відповідно до міжнародних стандартів. Прилад забезпечує високу точність, відтворюваність результатів і належить до сучасних засобів неруйнівного контролю, що широко застосовуються на промислових підприємствах як в Україні, так і за її межами.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання твердості гумових матеріалів відповідно до вимог міжнародних стандартів із застосуванням твердоміра ТШ-ISO-2.

Предмет дослідження – метрологічні, конструктивні та експлуатаційні характеристики твердоміра ТШ-ISO-2, а також методи та засоби забезпечення точності й відтворюваності результатів вимірювання твердості гумових зразків.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення ефективності та достовірності контролю твердості гумових виробів шляхом дослідження, аналізу технічних характеристик і метрологічного забезпечення твердоміра ТШ-ISO-2 та розроблення рекомендацій щодо його застосування відповідно до міжнародних стандартів.

Для досягнення мети у кваліфікаційній роботі бакалавра потрібно вирішити наступні завдання:

– описати технічну характеристику та службове призначення твердоміра ТШ-ISO-2;

					ВР 509.00.00.000. ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

- провести аналіз існуючих аналогів засобів вимірювання твердості еластомерних матеріалів, зокрема методи за Шором, визначити їх переваги, недоліки та сфери застосування;
- описати принцип роботи та фізичні перетворення, які покладено в основу роботи твердомірів для контролю твердості гумових зразків;
- розглянути будову і принцип дії твердоміра ТШ-ISO-2, проаналізувати умови проведення вимірювань та їх вплив на точність контролю твердості гумових зразків;
- розробити кінематичну схему твердоміра ТШ-ISO-2, описати його принцип роботи та методику передачі показів;
- дослідити структурну схему електронної частини твердоміра ТШ-ISO-2 та проаналізувати повний цикл перетворення сигналу – від механічного переміщення індентора до формування цифрового значення твердості IRHD;
- дослідити конструкцію та принцип дії індуктивного датчика твердоміра ТШ-ISO-2 як первинного вимірювального перетворювача, проаналізувати залежність диференційної напруги від переміщення осердя, оцінити лінійність, чутливість і завадостійкість перетворення, а також визначити вплив конструктивних параметрів і умов експлуатації на точність вимірювання мікропереміщень індентора при визначенні твердості за методом IRHD;
- виконати інженерний розрахунок електронного блоку твердоміра ТШ-ISO-2 з метою обґрунтування його параметрів;
- проаналізувати порядок підготовки твердоміра ТШ-ISO-2 до роботи після транспортування або тривалого зберігання, а також регламент технічного обслуговування приладу, з метою оцінювання впливу монтажу, мастила, температурної стабілізації, очищення напрямних вузлів та правильності встановлення навантажень на точність, відтворюваність і метрологічну надійність вимірювання твердості за методом IRHD;
- розробити методику повірки твердомірів ТШ-ISO-2.

					ВР 509.00.00.000. ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

**РОЗДІЛ 1**  
**ЗАГАЛЬНОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА**

**1.1 Технічна характеристика та службове призначення твердоміра ТШ-ISO-2**

Твердомір ТШ-ISO-2 (рис. 1.1) призначений для вимірювання та контролю твердості гумових зразків згідно з методиками, регламентованими державним стандартом ГОСТ 20403 та міжнародним стандартом ISO 48. Прилад орієнтований на застосування в умовах заводських і випробувальних лабораторій підприємств, що здійснюють розроблення, виготовлення, випробування та експлуатацію гумових технічних виробів [1].



Рисунок 1.1 – Твердомір ТШ-ISO-2 для контролю твердості гумових зразків за міжнародними стандартами [1]

Твердомір забезпечує високу точність і відтворюваність результатів вимірювань, що дозволяє використовувати його як для виробничого контролю якості, так і для проведення дослідницьких та сертифікаційних випробувань. Конструктивне виконання приладу та використання сучасних вимірювальних елементів забезпечують стабільність показів і зручність експлуатації в лабораторних умовах.

Твердомір ТШ-ISO-2 зберігає свої метрологічні характеристики за дотримання таких умов експлуатації:

- температура навколишнього повітря  $(23 \pm 3) ^\circ\text{C}$ ;
- відносна вологість повітря, не більше 80 %;
- напруга мережі змінного струму  $(220_{-33}^{+22}) \text{ В}$ , частота  $(50 \pm 1) \text{ Гц}$ .

Твердомір зберігає роботоспроможність при температурі навколишнього середовища від 15 до 35  $^\circ\text{C}$ .

Технічні характеристики твердоміра залежно від використовуваної методики, наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1– Технічні характеристики твердоміра ТШ-ISO-2 [1]

№ п/п	Найменування параметра	Значення під час реалізації методики	
		ГОСТ 20403	ISO 48
1.	Діапазон вимірювання – IRHD – мм	30-99 0,04-1,80	30-95 0,13-1,80
2.	Діаметр кульки індентора, мм	2,50±0,01	2,50±0,01
3.	Діаметр притискної лапки, мм – зовнішній – внутрішній	20±1 6±1	20±1 6±1
4.	Навантаження на кульку індентора, Н – попереднє – основне – загальне	0,30±0,02 5,40±0,01 5,70±0,03	0,30±0,02 5,40±0,01 5,70±0,03
5.	Навантаження на притискну лапку, Н	8,3±1,5	8,3±1,5

Ціна поділки відлікового пристрою твердоміра при переміщенні індентора:

- в режимі повірки – 10 мкм;
- в режимі вимірювання – 0,5 IRHD.



додатково занурюється в матеріал. Різниця між глибинами занурення при попередньому та загальному навантаженнях є величиною, що перераховується у значення твердості в одиницях IRHD [2].

Залежно від габаритних розмірів і товщини зразків випробування проводять із використанням твердоміра або мікротвердоміра. Вибір типу приладу визначається товщиною та фізико-механічними характеристиками матеріалу.

Зразки для випробувань повинні відповідати вимогам ГОСТ 269-66. Верхня і нижня поверхні зразків мають бути плоскими та паралельними між собою, що забезпечує рівномірний розподіл навантаження під час вимірювання. Допустима різниця між максимальною та мінімальною товщиною зразка не повинна перевищувати 0,2 мм, оскільки більші відхилення можуть спричинити похибку результатів [3].

Для випробувань на твердомірі рекомендована товщина зразків становить 8-10 мм. Дозволяється використання зразків товщиною не менше 4 мм, проте у цьому випадку номінальну товщину та допустимі відхилення необхідно зазначати в нормативно-технічній документації на конкретний вид продукції та метод її контролю. Якщо забезпечити необхідну товщину неможливо, допускається складання двох зразків за умови, що їхні контактні поверхні є плоскими і паралельними [4].

Для випробувань на мікротвердомірі товщина зразків повинна становити  $(2,0 \pm 0,5)$  мм. Можливе застосування зразків товщиною не менше 1 мм за умови обов'язкового зазначення фактичної товщини та допустимих відхилень у відповідній технічній документації.

Твердомір і мікротвердомір, що застосовуються для визначення твердості гуми за методом IRHD, повинні містити такі основні вузли та елементи:

- індентор у вигляді кульки або стержня з напівсферичною робочою поверхнею, виготовлений з матеріалу з високою твердістю та зносостійкістю;
- пристрій для створення попереднього та основного навантажень,

причому загальне навантаження є сумою попереднього та додаткового навантажень. Попереднє навантаження формується за рахунок маси індентора, пов'язаних з ним деталей та зусилля вимірювального механізму;

– вимірювальний пристрій для визначення глибини занурення індентора, шкала якого має бути проградуйована в міжнародних одиницях IRHD або в метричних одиницях довжини з ціною поділки 0,01 мм;

– плоску притискну лапку, розташовану перпендикулярно до осі індентора, з центральним отвором для його проходження, що забезпечує фіксацію зразка під час випробування;

– механізм усунення впливу тертя (наприклад, вібраційний пристрій), який забезпечує стабільність показів і підвищує точність вимірювань. У сучасних приладах, де конструктивно мінімізовано тертя, застосування такого пристрою може бути необов'язковим.

Таким чином, метод IRHD забезпечує відтворену та стандартизовану оцінку твердості гумових матеріалів, що широко застосовується для контролю якості продукції та підтвердження її відповідності нормативним вимогам [5].

### 1.2.1 Твердомір гуми типу ТШР

Твердомір гуми типу ТШР (рис. 1.2) призначений для визначення твердості гумових матеріалів методом вдавнення сталеві загартованої кульки під дією постійного навантаження відповідно до вимог стандартів ДСТУ 263:2008 (ISO 7619-1-2004) та DIN 53505. Метод вимірювання базується на визначенні глибини проникнення індентора в досліджуваний зразок, що характеризує опір матеріалу локальній деформації [6].

Принцип роботи приладу полягає у прикладанні до сталеві кульки спочатку початкового вимірювального навантаження, а потім – основного (робочого) навантаження. Після стабілізації навантаження здійснюється відлік глибини вдавнення індентора за шкалою відлікового пристрою. Отримане значення використовується для визначення твердості матеріалу.



Рисунок 1.2 – Твердомір гуми ТШР [6]

Технічні характеристики твердоміра гуми ТШР (за Шором):

- межі вимірювання за шкалою приладу: 0-2 мм;
- робочий діапазон вимірювання: 0,01-2 мм;
- ціна поділки шкали відлікового механізму: 0,01 мм;
- початкове вимірювальне навантаження:  $50 \pm 5$  кг;
- основне (постійне) навантаження:  $1000 \pm 2$  кг;
- діаметр загартованої сталевий кульки (індентора):  $5 \pm 0,005$  мм;
- габаритні розміри приладу:  $150 \times 150 \times 350$  мм;
- маса приладу: приблизно 7,8 кг.

Конструкція приладу забезпечує стабільність прикладеного навантаження та точність відліку глибини проникнення кульки, що дозволяє отримувати відтворювані результати вимірювання твердості гумових матеріалів у лабораторних умовах.

### 1.2.2 Твердомір гуми ВТШЦ-А (цифровий)

Твердомір гуми ВТШЦ-А (рис. 1.3) призначений для визначення твердості поверхні виробів із гуми та полімерних матеріалів методом Шора відповідно до вимог ГОСТ 263-75 [7].

					ВР 509.00.00.000. ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		



вінілу, бутилових та нітрилових матеріалів, м'яких пластиків, шкіри, воску та подібних матеріалів.

Технічні характеристики твердоміра ВТШЦ-А:

- діапазон вимірювання: 0-100 одиниць твердості за Шором;
- ціна поділки шкали: 1 одиниця твердості;
- границя допустимої похибки переміщення індентора:  $\pm 1$  одиниця шкали;
- габаритні розміри приладу: 115×60×25 мм;
- маса приладу: не більше 0,5 кг.

Додаткові особливості цифрового виконання

- електронна індикація результатів вимірювання;
- зменшення суб'єктивної похибки зчитування;
- компактність і мобільність;
- можливість використання у виробничих умовах для оперативного контролю.

Твердомір ВТШЦ-А є зручним портативним засобом експрес-контролю твердості гум і полімерів. Завдяки відповідності міжнародним стандартам прилад може застосовуватися як у лабораторних, так і у виробничих умовах. Водночас порівняно з методом IRHD він забезпечує дещо меншу точність, проте виграє за швидкістю та простотою використання.

### 1.2.3 Твердомір гуми за Шором ТН210

Твердомір гуми за Шором ТН210 (рис. 1.4, а) є портативним цифровим приладом із вбудованим датчиком, призначеним для визначення твердості матеріалів за шкалою Shore D [8].

Прилад відповідає вимогам міжнародних стандартів DIN 53505, ASTM D2240, ISO 7619 та JIS K7215, що підтверджує його придатність для проведення вимірювань твердості відповідно до загальноприйнятих методик. Передбачена можливість передавання результатів вимірювань на персональний комп'ютер через інтерфейс RS-232, що забезпечує інтеграцію приладу в системи

					ВР 509.00.00.000. ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		





Робота приладу ґрунтується на методі пружного вдавнення індентора визначеної геометрії у поверхню досліджуваного матеріалу під стандартизованим зусиллям. Глибина проникнення індентора перетворюється в умовні одиниці твердості за шкалою Shore D. Чим менша глибина занурення, тим вища твердість матеріалу.

Твердомір ТН210 використовується для контролю твердості твердих гум, пластмас, композитних матеріалів, полімерних виробів, технічних еластомерів.

Завдяки портативності та простоті експлуатації прилад ефективно застосовується у виробничих цехах, під час вхідного контролю матеріалів та при технічній діагностиці виробів.

У результаті проведеного аналізу нормативної бази та існуючих аналогів твердомірів для контролю твердості гумових матеріалів встановлено, що вимірювання твердості здійснюється відповідно до міжнародно визнаних методів – IRHD та Шора, регламентованих стандартами ГОСТ 20403, ISO 7619, DIN 53505, ASTM D2240, JIS K7215 та іншими.

Метод IRHD характеризується високою точністю та відтворюваністю результатів, оскільки базується на вимірюванні різниці глибини проникнення індентора під дією попереднього та основного навантажень. Він переважно застосовується у лабораторних умовах і вимагає жорсткого дотримання вимог до геометрії та товщини зразків. Разом з тим, обладнання для реалізації цього методу є складнішим конструктивно та менш мобільним.

Аналіз твердомірів типу ТШР показав, що такі прилади забезпечують достатню точність вимірювання за рахунок стабільного прикладання значного навантаження, проте мають значні габарити, масу та призначені переважно для стаціонарного лабораторного використання.

Цифрові портативні твердоміри типу ВТШЦ-А та ТН210 забезпечують оперативний контроль твердості за шкалою Шора, відзначаються компактністю, автономністю живлення, зручністю експлуатації та можливістю використання безпосередньо у виробничих умовах. Модель ТН210 додатково

					ВР 509.00.00.000. ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

має функцію передачі даних через інтерфейс RS-232, що розширює її можливості щодо автоматизації контролю. Водночас такі прилади поступаються методу IRHD за метрологічною точністю, особливо при контролі тонких або високоточних зразків.

Критичний аналіз інформаційних джерел та технічних характеристик існуючих приладів показав, що сучасні твердоміри повинні поєднувати:

- відповідність міжнародним стандартам;
- достатню точність та повторюваність результатів;
- мінімізацію впливу людського фактору;
- можливість цифрової обробки та збереження результатів;
- зручність експлуатації у виробничих умовах.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує актуальність розроблення або удосконалення твердоміра типу ТШ-ISO-2, який повинен поєднувати метрологічну надійність лабораторних методів із мобільністю та функціональністю сучасних цифрових приладів. Отримані результати аналізу є підґрунтям для формування технічних вимог та подальшого проектування електронного та вимірювального блоку приладу.

### **1.3 Фізичні перетворення, які використовуються в твердомірі**

Твердість – це механічна властивість матеріалу, яка характеризує його здатність чинити опір локальній пластичній або пружній деформації, зокрема проникненню в нього іншого, більш твердого тіла. Інакше кажучи, твердість відображає опір матеріалу вдавлюванню, подряпуванню або іншим видам поверхневого руйнування [9].

Слід зазначити, що сучасні фізичні теорії твердого тіла не дають універсального аналітичного опису твердості, оскільки вона залежить від значної кількості чинників: структури матеріалу, фазового складу, ступеня кристалічності, температури, швидкості прикладання навантаження, форми та

розмірів індентора тощо. Тому твердість не є фундаментальною фізичною сталою матеріалу. Це умовна характеристика, значення якої визначається конкретним методом випробування та встановленими умовами його проведення. Без зазначення методу та параметрів вимірювання поняття твердості є невизначеним.

Існує велика кількість методів визначення твердості, серед яких для металів і сплавів найбільш поширеними є методи Брінелля, Роквелла, Віккерса та Шора. Ці методи стандартизовані в більшості промислово розвинених країн і регламентуються міжнародними та національними нормативними документами.

Вибір конкретного методу вимірювання зумовлений механічними властивостями матеріалу, його структурою, товщиною виробу, вимогами до точності, а також умовами експлуатації та контролю. Для твердих металів застосовують одні методики, тоді як для еластомерів, пластмас і гумових матеріалів – інші.

Твердість за Шором є одним із найбільш поширених методів визначення твердості полімерних матеріалів [10]. Вона визначається шляхом втиснення стандартного індентора в поверхню матеріалу за допомогою спеціального приладу – дюрометра. Існують різні типи дюрометрів, зокрема:

- тип А – для м'яких матеріалів (гуми, еластомери, м'які пластмаси);
- тип D – для більш твердих полімерів і пластмас.

Метод базується на вимірюванні глибини проникнення індентора під дією стандартизованого зусилля. Можуть визначатися: початкова глибина вдавлення, глибина через заданий інтервал часу або обидва параметри одночасно. Отримане переміщення перетворюється в умовні одиниці твердості за шкалою від 0 до 100.

Метод Шора є емпіричним, оскільки не існує простої математичної залежності між отриманим значенням твердості та будь-якою фундаментальною фізичною характеристикою матеріалу, наприклад модулем

пружності чи межею текучості. Значення твердості за Шором характеризує матеріал лише в межах конкретного методу вимірювання [11].

Метод широко застосовується для оцінювання твердості низькомодульних матеріалів – пластмас, каучуків, гумових виробів, ебоніту, полімерних композиційних матеріалів. Він регламентується стандартами ГОСТ 24621-91 (ISO 868-85), ISO 7619-1:2010, DIN 53505, ASTM D2240 та іншими нормативними документами.

Перевагами методу є:

- простота конструкції вимірювального приладу;
- швидкість проведення вимірювань;
- можливість контролю безпосередньо на готових виробах;
- придатність для вимірювання на великогабаритних деталях і поверхнях із великим радіусом кривизни;
- можливість використання у виробничих умовах.

До недоліків належить відносно велике розсіювання результатів вимірювань, що зумовлене чутливістю методу до умов проведення випробування (температури, швидкості навантаження, товщини зразка, стану поверхні тощо).

Метод і відповідна шкала були запропоновані Альбертом Ф. Шором у 1920-х роках. Він також розробив вимірювальний прилад – дюрометр. Необхідно розрізнити дюрометр і склероскоп: останній також пов'язаний з ім'ям Шора, але працює за принципом відскоку ударного тіла і використовується переважно для визначення твердості металів.

Таким чином, при визначенні твердості за методом Шора вимірюється глибина проникнення індентора визначеної форми під дією стандартизованої сили в установлених умовах. Усі шкали поділені на 100 умовних одиниць, причому більші значення відповідають більш твердим матеріалам (рис.1.5). Метод завдяки своїй простоті та універсальності набув широкого поширення в практиці контролю якості полімерних та гумових виробів.







IRHD є близькими до значень, отриманих за шкалою Шора А, що спрощує практичну інтерпретацію результатів.

Таким чином, твердість гуми є функцією її модуля пружності та в'язко-еластичних характеристик. Графічна залежність твердості гуми від модуля пружності наведена на рисунку 1.6, що дозволяє наочно простежити кореляцію між механічними властивостями матеріалу та його показниками твердості [14].

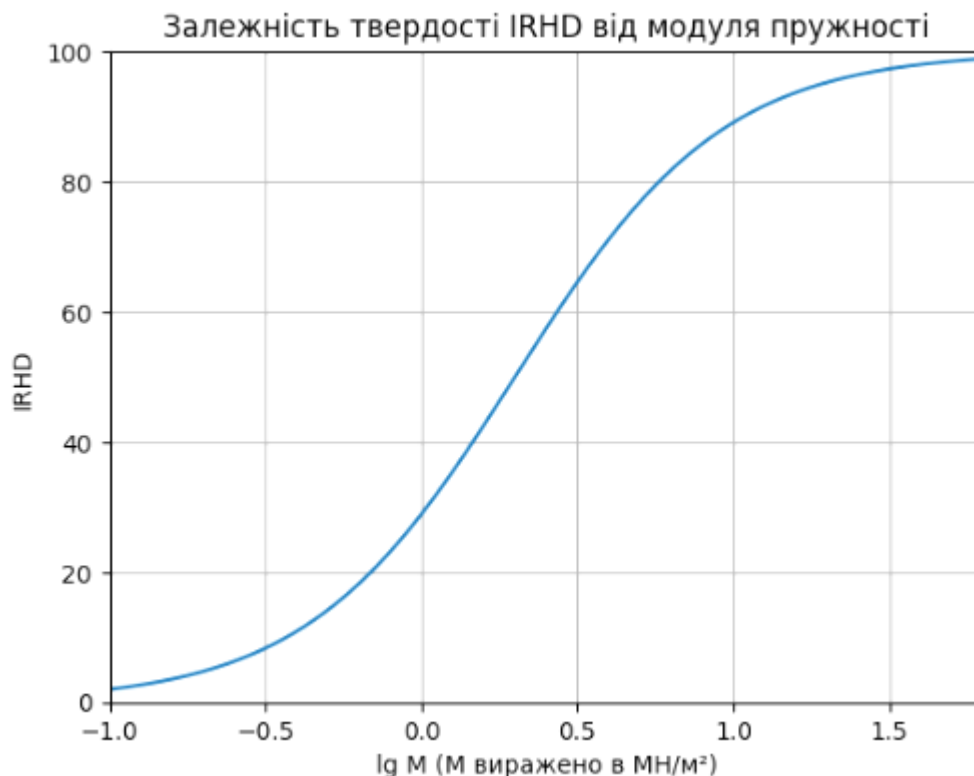


Рисунок 1.6 – Залежність твердості гуми від модуля пружності [14]

Залежність глибини проникнення індентора від твердості IRHD ґрунтується на взаємозв'язку між величиною вдавнення індентора в зразок гуми та модулем її пружності [2], що обчислюється за формулою (1.1):

$$\frac{F}{M} = 0,0038 \cdot r^{0,65} \cdot h^{1,35}, \quad (1.1)$$

де  $F$  – сила, Н;

$M$  – модуль Юнга, МН/м<sup>2</sup>;

$r$  – радіус кульки, мм;

$h$  – глибина проникнення індентора, 0,01 мм.

Формула (1.1) є приблизною і добре виконується для високоеластичних ізотропних матеріалів, наприклад, добре завулканізованих гум на основі натурального каучуку.

Застосуванні ймовірнісної кривої (інтегрована залежність нормального розподілу помилок), що зв'язує  $lgM$  і твердість в одиницях IRHD (креслення). У точці перегину  $lgM=0,364$ , а максимальний нахил дорівнює 57 одиниць IRHD на одиницю збільшення  $lgM$ .

Чим більший модуль пружності матеріалу, тим менша глибина проникнення індентора за однакового прикладеного навантаження, і відповідно – тим вище значення твердості.

Для еластичних матеріалів зв'язок між прикладеним навантаженням, геометрією індентора та глибиною його проникнення описується залежностями теорії пружності (за Герцем). У загальному вигляді модуль пружності  $E$  може бути виражений через параметри вдавнення (1.2):

$$E = \frac{3F}{4\sqrt{Rh}^{3/2}}, \quad (1.2)$$

де  $F$  – прикладене навантаження;

$R$  – радіус сферичного індентора;

$h$  – глибина проникнення індентора;

$E$  – модуль пружності матеріалу.

З наведеної формули (1.2) видно, що глибина проникнення індентора обернено залежить від модуля пружності: при збільшенні  $E$  величина  $h$  зменшується.

У методі IRHD вимірюється різниця глибини занурення індентора під



## РОЗДІЛ 2

### РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

#### 2.1 Будова і принцип роботи твердоміра ТШ-ISO-2

Загальний вигляд твердоміра типу ТШ-ISO-2 наведений на рисунку 2.1 [1].

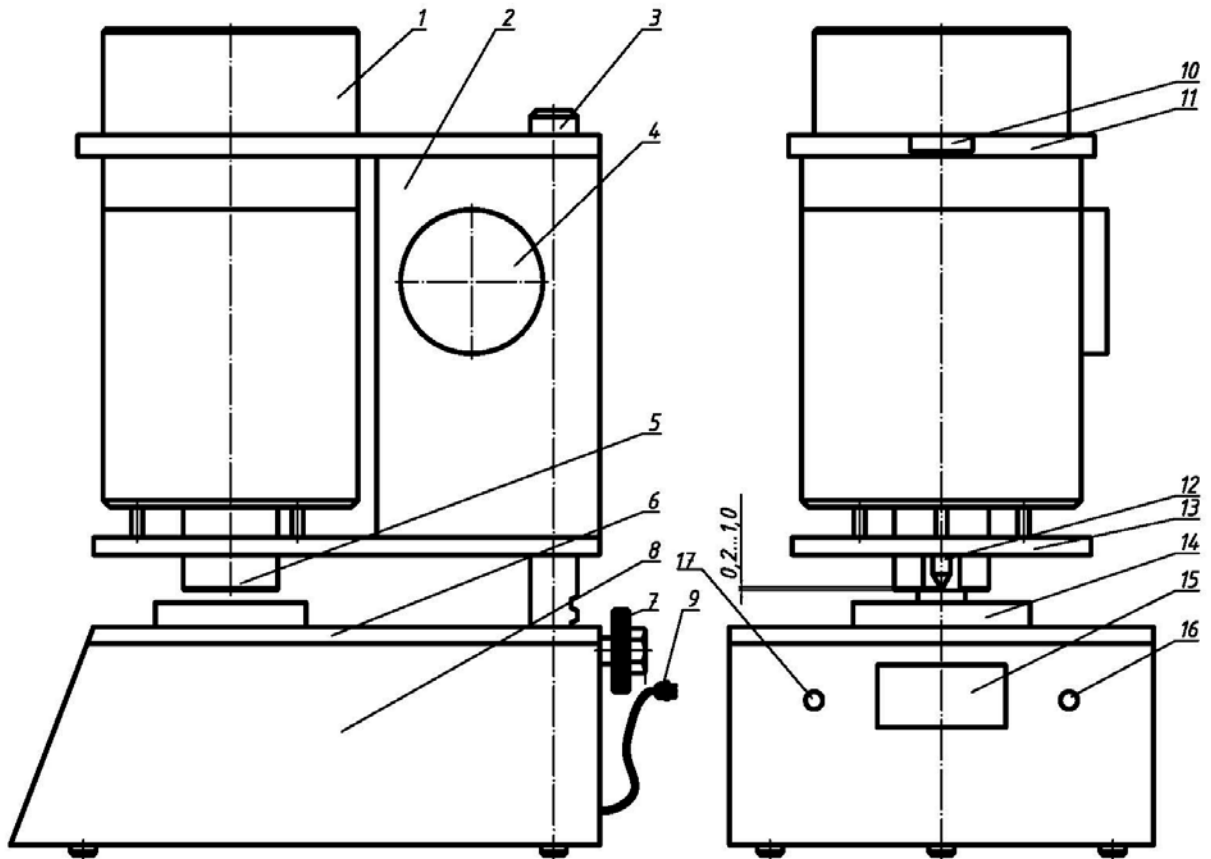


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд твердоміра ТШ-ISO-2 [1]:

- 1 – навантажувальний пристрій; 2 – корпус; 3 – стійка; 4 – рукоятка;  
5 – притискна лапка; 6 – основа; 7 – гвинт спеціальний; 8 – електронний блок; 9 – вилка електроживлення; 10 – показчик навантаження; 11 – верхня направляюча планка; 12 – індентор, 13 – нижня напрямна; 14 – гумовий зразок планка; 15 – відліковий пристрій; 16 – світлодіод «мережа»;  
17 – світлодіод «робота»

Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата

ВР 509.00.00.000. ПЗ

Лист

Прилад виконаний у вигляді стаціонарної лабораторної установки, що складається з механічного вимірювального вузла, системи створення навантаження та електронного блока обробки сигналу. Конструкція твердоміра забезпечує прикладання до індентора попереднього та основного навантажень відповідно до вимог стандарту ISO, а також точне вимірювання глибини його проникнення в досліджуваний зразок.

Конструктивне виконання приладу забезпечує жорсткість системи, мінімізацію впливу паразитних деформацій і тертя, а також відтворюваність результатів вимірювань.

Суть методу визначення твердості полягає у вимірюванні різниці між глибиною занурення індентора з кульковим наконечником у зразок під дією попереднього та загального (сумарного) навантажень. Попереднє навантаження забезпечує початковий контакт індентора з поверхнею зразка та часткове усунення впливу мікронерівностей. Після прикладання основного навантаження індентор додатково вдавлюється в матеріал, а різниця глибин проникнення використовується для визначення твердості в міжнародних одиницях IRHD.

Вимоги до підготовки зразків, методики проведення випробувань, умов вимірювання та обробки отриманих результатів регламентуються стандартами ГОСТ 20403 та міжнародним стандартом ISO 48. Зокрема, встановлюються вимоги до товщини, паралельності поверхонь зразка, температурних умов проведення випробувань і тривалості витримки під навантаженням.

Конструктивно прилад складається з двох основних частин – нерухомої (станинної) та рухомої.

У нерухомій частині, виконаній у вигляді корпусу, розміщені:

- блок реєстрації та індикації результатів вимірювання;
- покажчик або система контролю прикладеного навантаження;
- напрямні елементи для переміщення рухомого вузла.

У рухомій частині основним робочим елементом є індентор із

загартованою сталевною кулькою, який безпосередньо контактує з досліджуваним матеріалом і здійснює його локальне вдавнення.

Навантажувальний пристрій 1 із притискною лапкою 5, розташованою на його кінці, вільно переміщується у вертикальному напрямку по напрямних 11 і 13, закріплених на корпусі 2. Керування навантажувальним механізмом здійснюється за допомогою рукоятки 4, яка через кулачковий механізм, розміщений у корпусі 2, забезпечує послідовне прикладання попереднього та основного навантажень. Корпус 2 встановлений на стійці 3 і може переміщуватися вздовж неї для зручності встановлення та регулювання положення індентора.

Досліджуваний зразок 14 розміщується на опорній основі 6, що забезпечує його стабільне положення під час випробування та рівномірний розподіл навантаження.

Така конструкція приладу забезпечує стабільність прикладених зусиль, точність вимірювання глибини проникнення індентора та відтворюваність результатів визначення твердості.

## 2.2 Кінематична схема твердоміра ТШ-ISO-2

Кінематична схема твердоміра ТШ-ISO-2 наведена на рисунку 2.2 [1].

Робота приладу відбувається в такій послідовності. У вихідному положенні кулачок 12 за допомогою рукоятки 14 повернутий за годинниковою стрілкою до упору. При цьому корпус 15 разом із навантажувальним пристроєм 6 та притискною лапкою 19 знаходяться у верхньому положенні. Кільце 3 утримує вантаж 5 у піднятому стані та через шайбу 9 – шток 4 з індентором 2 (кулькою) на його кінці. У цьому положенні кулька індентора розташована на 0,2-1,0 мм вище площини притискної лапки 19. На основу 20 встановлюють гумовий зразок 1, після чого рукоятку 14 повертають проти годинникової стрілки до моменту початку блимання світлодіода «Робота».

					ВР 509.00.00.000. ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

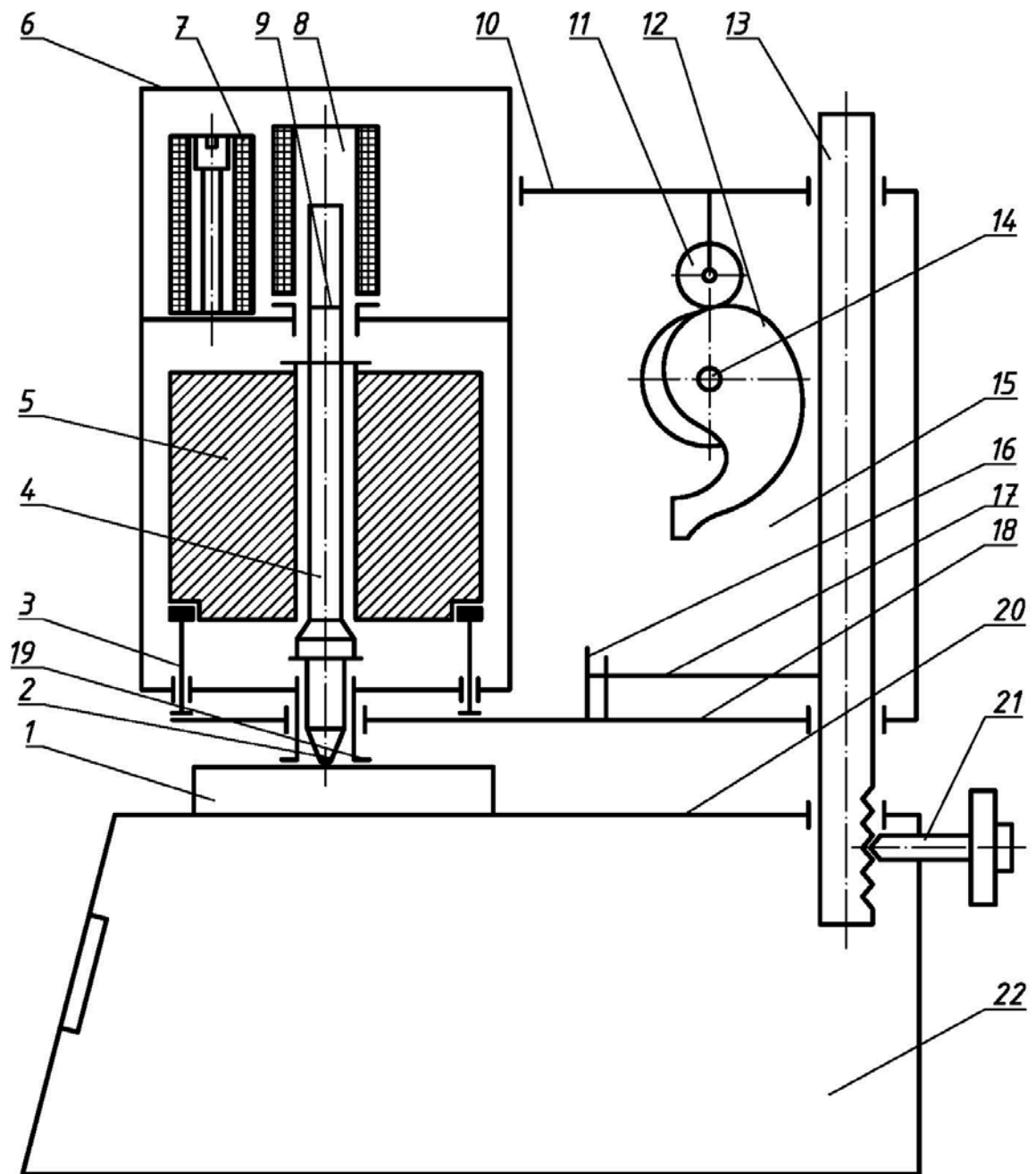


Рисунок 2.2 – Кінематична схема твердоміра ТШ-ISO-2 [1]:

- 1 – гумовий зразок; 2 – індентор з кулькою; 3 – кільце; 4 – шток; 5 – вантаж;  
 6 – навантажувальний пристрій, 7 – компенсуюча котушка; 8 – робоча котушка; 9 – шайба; 10 – напрямна планка; 11 – штовхач; 12 – кулачок;  
 13 – стійка; 14 – рукоятка; 15 – корпус; 16 – вилка; 17 – штифт;  
 18 – направляюча планка; 19 – притискна лапка; 20 – основа; 21 – гвинт спеціальний; 22 – електронний блок

Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата

У процесі повороту навантажувальний пристрій 6 опускається, і притискна лапка 19 впирається в поверхню зразка 1 та зупиняється. Водночас кільце 3 разом із напрямною планкою 18, вантажем 5 і штоком 4 продовжує рух униз доти, доки кулька індентора 2 не торкнеться поверхні зразка.

У цей момент до зразка прикладається попереднє навантаження величиною  $(0,30 \pm 0,02)$  Н, що створюється масою штока 4. Після припинення блимання світлодіода рукоятку 14 продовжують повертати проти годинникової стрілки до упору.

При подальшому переміщенні механізму вантаж 5 масою 550 г опускається на шток 4, а кільце 3 переміщується ще нижче. У результаті до індентора прикладається загальне навантаження  $(570,00 \pm 0,03)$  Н, яке є сумою навантажень від маси вантажу 5 та штока 4. Під дією цього зусилля індентор занурюється в гумовий зразок на глибину, що залежить від його твердості.

Контроль переміщення індентора здійснюється за допомогою індуктивного датчика, який складається з робочої котушки 8, жорстко пов'язаної з притискною лапкою 19, та феритового стержня, закріпленого на штоку 4. Під час відносного переміщення штока змінюється магнітний потік у котушці, що викликає зміну електричного сигналу, пропорційного глибині занурення індентора. Сигнал надходить до електронного блока 22, де обробляється та відображається на індикаторному табло.

Оскільки нульове значення на табло встановлюється при дії попереднього навантаження, індикатор показує додаткове занурення індентора під впливом основного навантаження, тобто величину, що безпосередньо використовується для визначення твердості.

Остаточне значення твердості автоматично фіксується на індикаторному табло через 30 с після прикладання основного навантаження, що відповідає вимогам стандарту щодо часу витримки.

При зворотному повороті рукоятки 14 спочатку зі штока 4 знімається вантаж 5. Далі шайба 9, спираючись на вантаж, піднімає шток 4 разом з





забезпечує високу чутливість до переміщення феритового осердя та компенсацію впливу температурних і паразитних факторів.

При переміщенні індентора змінюється положення феритового стержня відносно котушок, що спричиняє розбаланс моста та появу різницевого сигналу. Цей сигнал надходить на диференціальний підсилювач А1, який виконує:

- підсилення корисного сигналу;
- придушення синфазних перешкод;
- підвищення завадостійкості системи.

Після підсилення змінний сигнал подається на інтегральний випрямляч А2, де перетворюється в постійну напругу, пропорційну амплітуді переміщення індентора. Далі сигнал надходить на масштабуючий підсилювач А3, який забезпечує узгодження рівня напруги з діапазоном вхідного сигналу АЦП.

Через вхідний буфер BUF аналоговий сигнал подається на аналого-цифровий перетворювач ADC, де здійснюється його квантування та перетворення у цифровий код.

Отримане цифрове значення надходить до центрального процесорного модуля Р, який:

- обробляє дані відповідно до вибраного режиму роботи (настройка або вимірювання);
- виконує корекцію та масштабування;
- забезпечує витримку необхідних часових інтервалів;
- формує кінцевий результат у міжнародних одиницях твердості IRHD.

Таймер Т використовується для формування регламентованих часових затримок (наприклад, 8 с при попередньому навантаженні та 30 с при основному навантаженні). Хід відліку часу індикується світлодіодом LED.

Кінцевий вимикач S1 забезпечує автоматичний запуск відліку часу попереднього навантаження після досягнення відповідного положення

механізму. Перемикач S2 дозволяє обирати режим роботи приладу – калібрування (настройка) або вимірювання.

Оброблений процесором сигнал через КМОП-драйвер MD подається на світлодіодний дисплей DISPLAY, де відображається остаточний результат вимірювання.

Блок живлення PS формує стабілізовані напруги, необхідні для живлення аналогових і цифрових вузлів електронної частини приладу, забезпечуючи електричну ізоляцію та зниження рівня перешкод.

Таким чином, електронна частина твердоміра ТШ-ISO-2 реалізує повний цикл перетворення механічного переміщення індентора в цифрове значення твердості з урахуванням часових параметрів випробування та вибраного режиму роботи.

## **2.4 Конструкція та принцип роботи індуктивного давача твердоміра ТШ-ISO-2**

Індуктивний давач твердоміра ТШ-ISO-2 призначений для перетворення лінійного переміщення індентора, що виникає під дією прикладеного навантаження, у електричний сигнал, пропорційний глибині його занурення у випробуваний матеріал [1].

Давач є первинним вимірювальним перетворювачем у складі електронного вимірювального каналу приладу [16]. Отриманий аналоговий сигнал надалі підсилюється, випрямляється, фільтрується та перетворюється в цифрову форму для відображення значення твердості за шкалою IRHD.

Індуктивний давач (рис. 2.4) має осьово-симетричну циліндричну конструкцію та складається з таких основних елементів:

- корпус;
- верхній та нижній магнітопроводи;
- первинна (збуджуюча) обмотка;



- дві вторинні (вимірювальні) обмотки;
- рухоме осердя;
- шток індентора;
- напрямні та центрувальні елементи;
- регулювальні та кріпильні деталі;
- електричні виводи.

Конструкція є симетричною відносно вертикальної осі, що забезпечує мінімізацію похибок та лінійність характеристики перетворення.

Магнітна система складається з верхнього та нижнього ярм (магнітопроводів), виконаних з магнітом'якої електротехнічної сталі. Вони утворюють замкнений магнітний контур для змінного магнітного потоку.

Всередині магнітопроводу розташовані:

- первинна обмотка (котушка збудження);
- дві вторинні вимірювальні обмотки, з'єднані диференційно.

Котушки розміщені на ізоляційних каркасах і залиті компаундом для запобігання вібрацій та зміщення витків.

Рухома частина складається з:

- феромагнітного осердя;
- штока;
- індентора (кульки);
- центрувальних втулок.

Осердя жорстко з'єднане зі штоком, який передає переміщення від індентора. Переміщення відбувається строго вздовж осі давача. Напрямні втулки забезпечують співвісність руху та мінімальний люфт.

Корпус виконує такі функції:

- фіксація магнітної системи;
- забезпечення жорсткості конструкції;
- захист від механічних впливів;
- можливість монтажу на станині твердоміра.

У нижній частині передбачено регулювальний вузол для встановлення нульового положення осердя. Кріплення деталей здійснюється гвинтами та різьбовими втулками.

Принцип роботи базується на зміні взаємоіндукції між первинною та вторинними обмотками при переміщенні феромагнітного осердя. Первинна обмотка живиться змінною напругою від генератора електронного блоку. Внаслідок цього в магнітопроводі створюється змінний магнітний потік  $\Phi$ .

При центральному (нульовому) положенні осердя:

– магнітний потік симетрично розподіляється між вторинними обмотками;

– ЕРС у них однакові за величиною;

– диференційна напруга дорівнює нулю.

При переміщенні осердя вниз або вгору:

– змінюється магнітний опір відповідних ділянок магнітного кола;

– в одній вторинній обмотці ЕРС збільшується, в іншій – зменшується;

– на виході з'являється диференційна напруга, пропорційна величині переміщення.

Таким чином, формується сигнал (2.1):

$$U_{вих} \approx \Delta x, \quad (2.1)$$

де  $\Delta x$  – переміщення індентора.

Робота давача у складі твердоміра під час вимірювання відбувається у наступній послідовності:

– індентор контактує із зразком;

– під дією навантаження кулька занурюється в матеріал;

– шток переміщується разом з осердям;

– змінюється диференційна напруга вторинних обмоток;

– електронний блок підсилює, випрямляє та оцифровує сигнал;



## 2.5 Розрахунок електронного блоку твердоміра ТШ-ISO-2

### 2.5.1 Вихідні дані для розрахунку

Максимальне переміщення індентора:  $h_{max}=0,5$  мм.

Діапазон вимірювання твердості: 0-100 IRHD.

Напруга живлення електронного блоку:  $U_{жив}=12$  В.

Діапазон вхідної напруги АЦП:  $U_{АЦП}=0-5$  В.

Розрядність АЦП:  $n=12$  біт.

### 2.5.2 Розрахунок вихідного сигналу індуктивного датчика

Приймемо чутливість індуктивного датчика:  $S=6$  мВ/мкм.

Максимальне переміщення індентора:  $h_{max}=500$  мкм.

Максимальна вихідна напруга датчика визначається за формулою (2.2):

$$U_{датч} = S \cdot h_{max}. \quad (2.2)$$

$$U_{датч} = 6 \cdot 500 = 3000 \text{ мВ} = 3 \text{ В.}$$

Отже, датчик формує змінний сигнал у межах 0-3 В.

### 2.5.3 Розрахунок масштабуючого підсилювача

Для повного використання діапазону АЦП необхідно підсилити сигнал до рівня 4,5 В [16, 17].

Коефіцієнт підсилення визначається за формулою (2.3):

$$K = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}. \quad (2.3)$$

$$K = \frac{4,5}{3} = 1,5.$$

Для неінвертуючого підсилювача [18] коефіцієнт підсилення визначається за формулою (2.4):

					ВР 509.00.00.000. ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

$$K = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (2.4)$$

Прийmemo:  $R_1=10$  кОм.

Тоді:  $\frac{R_2}{R_1} = 0,5$ ,  $R_2=5$  кОм.

Приймаемо стандартне значення:  $R_2=4,99$  кОм.

2.5.4 Розрахунок параметрів інтегрального випрямляча та фільтра

Частота генератора живлення датчика:  $f=4$  кГц.

Період сигналу:  $T=0,25$  мс.

Для згладжування пульсацій постійна часу RC-фільтра повинна задовольняти умову (2.5):

$$\tau \geq 20T. \quad (2.5)$$

$$\tau = 20 \cdot 0,25 = 5 \text{ мс.}$$

Оскільки постійна часу RC-фільтра визначається за формулою (2.6):

$$\tau = R \cdot C. \quad (2.6)$$

Прийmemo:  $R=10$  кОм.

Тоді ємність RC-фільтра визначається за формулою (2.7):

$$C = \frac{\tau}{R}. \quad (2.7)$$

$$C = \frac{0,005}{10000} = 0,5 \text{ мкФ.}$$

Приймаемо стандартне значення:  $C=0,47$  мкФ.

### 2.5.5 Розрахунок роздільної здатності вимірювання

Зміна напруги кроку квантування АЦП  $K_h$  визначається за формулою (2.8):

$$\Delta U = \frac{U_{\text{АЦП}}}{2^n}. \quad (2.8)$$

$$\Delta U = \frac{5}{4096} = 1,22 \text{ мВ.}$$

Оскільки 4,5 В відповідає переміщенню 0,5 мм:

$$K_h = \frac{4,5}{0,5} = 9 \text{ В/мм.}$$

Мінімально вимірюване переміщення визначається за формулою (2.9):

$$\Delta h = \frac{\Delta U}{K_h}. \quad (2.9)$$

$$\Delta h = \frac{1,22}{9000} = 0,000135 \text{ мм.}$$

$$\Delta h = 0,135 \text{ мкм.}$$

### 2.5.6 Роздільна здатність за шкалою IRHD

Оскільки 0,5 мм відповідає 100 IRHD: 1 IRHD=0,005 мм.

Мінімальна зміна твердості визначається за формулою (2.10):

$$\Delta IRHD = \frac{\Delta h}{0,005}. \quad (2.10)$$

$$\Delta IRHD = 0,027.$$

Отже, теоретична дискретність становить приблизно 0,03 IRHD, що

значно менше допустимої похибки  $\pm 1$  IRHD.

### 2.5.7 Розрахунок блоку живлення

Сумарний струм споживання визначається за формулою (2.11):

$$I_{\text{заг}} = I_{\text{МК}} + I_{\text{ОП}} + I_{\text{Інд}} + I_{\text{Ін}}. \quad (2.11)$$

$$I_{\text{заг}} = 40 + 15 + 120 + 25 = 200 \text{ мА.}$$

Споживана потужність визначається за формулою (2.12):

$$P = U_{\text{жив}} \cdot I_{\text{заг}}. \quad (2.12)$$

$$P = 12 \cdot 0,2 = 2,4 \text{ Вт.}$$

Обирається стабілізатор 5 В із запасом струму не менше 0,5 А [18].

У таблиці 2.1 наведено параметри елементів електронного блоку.

Таблиця 2.1 – Параметри елементів електронного блоку [18]

№	Найменування елемента	Позначення	Номинал	Примітка
1	Резистор	R1	10 кОм	1%
2	Резистор	R2	4,99 кОм	1%
3	Конденсатор	C1	0,47 мкФ	Плівковий
4	Операційний підсилювач	A1–A3	LM358 (або аналог)	Двоканальний
5	АЦП	ADC	12 біт	Вбудований у МК
6	Мікроконтролер	P	STM32 / AVR	5 В
7	Стабілізатор напруги	U <sub>ст</sub>	7805	5 В, 0,5 А
8	Світлодіодний індикатор	DISPLAY	7-сегментний	4 розряди

У результаті виконаного розрахунку встановлено, що електронний блок твердоміра ТШ-ISO-2 забезпечує:

- повне використання діапазону АЦП;
- теоретичну роздільну здатність близько 0,03 IRHD;
- достатній запас точності відносно нормативної похибки;
- споживану потужність не більше 2,5 Вт.

Запропоновані параметри елементів забезпечують стабільність роботи

вимірjuвального каналу та відповідність метрологічним вимогам до приладів контролю твердості гуми за методом IRHD.

## 2.6 Підготовка та порядок роботи з твердоміром

Після транспортування або тривалого зберігання перед введенням твердоміра в роботу необхідно виконати такі операції [1, 19].

1. Послабити гвинт кріплення стійки 4 (рис. 2.5), демонтувати транспортні болти 1 та видалити захисну підкладку 2, що запобігає переміщенню рухомих вузлів під час транспортування.

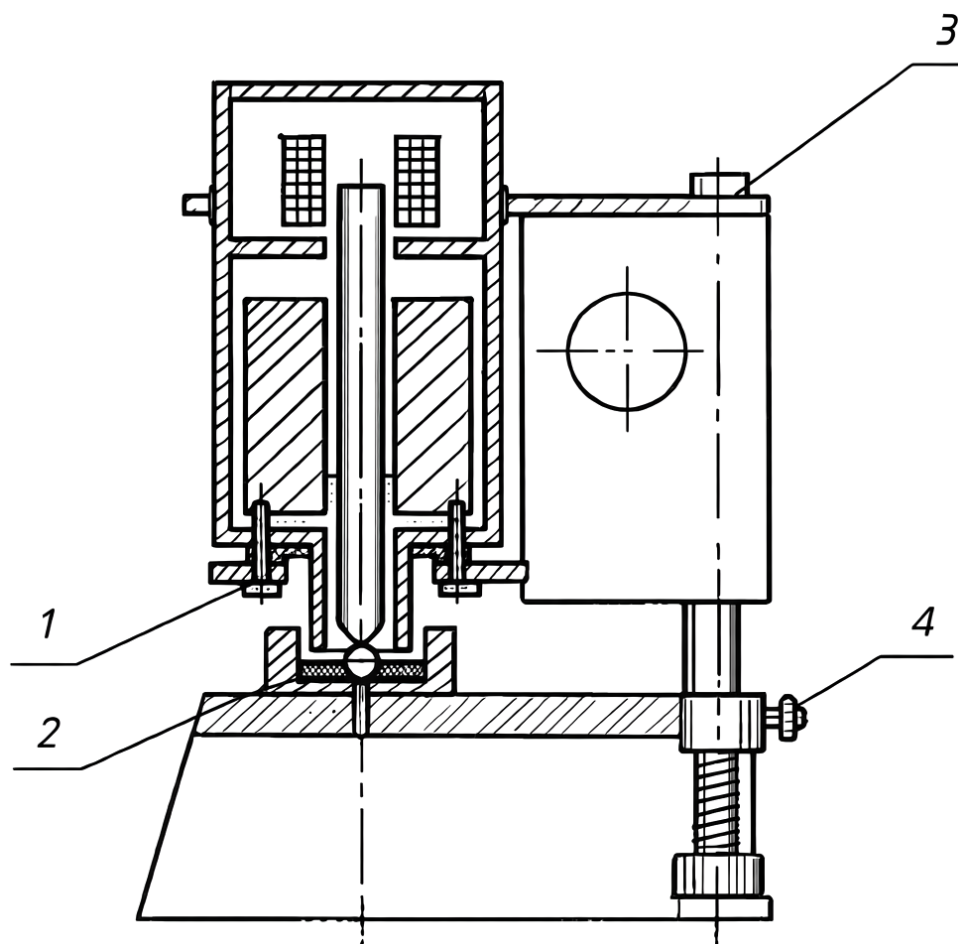


Рисунок 2.5 – Схема фіксації рухомих частин приладу під час транспортування: 1 – фіксуючі гвинти, 2 – підкладка; 3 – стійка; 4 – гвинт кріплення стійки

2. Встановити стійку 3 у робоче положення та надійно зафіксувати її гвинтом 4.

3. Зняти кришку корпусу 15 (рис. 2.2) та перевірити стан змащування напрямних стійки (позиції 1-2), кулачка 14 та штовхача 11. За наявності забрудненого або загуслого мастила його необхідно видалити бензином за ГОСТ 8505–80. Після очищення нанести тонкий рівномірний шар мастила ЦИАТИМ-201 відповідно до ГОСТ 11110–75. Переконайтеся, що всі рухомі частини переміщуються плавно, без заїдань та ривків.

4. Встановити прилад на рівну, жорстку та вібростійку поверхню. Допускається використання лабораторного столу з горизонтальною робочою площиною.

5. Підключити твердомір до мережі змінного струму напругою  $220_{-33}^{+22}$  В,  $(50 \pm 1)$  Гц.

6. Увімкнути прилад тумблером «МЕРЕЖА», розташованим на задній панелі. Після подачі живлення всі сегменти індикатора повинні засвітитися приблизно на 2 секунди, що підтверджує справність системи індикації та електронного блоку.

7. За наявності комплекту стандартних зразків твердості (ОСО ТР) за ТУ 38.405.678-88 необхідно виконати контрольні вимірювання згідно з ГОСТ 20403 та інструкцією з експлуатації ОСО ТР. Якщо розбіжність результатів перевищує  $\pm 2$  од. IRHD від значень, зазначених у свідоцтві, слід виконати очищення напрямних втулок та штока.

8. Якщо температура приладу перед початком роботи відрізняється від робочого діапазону (15-35 °С), твердомір необхідно витримати в робочому приміщенні не менше 2 годин для температурної стабілізації.

Безпосередньо перед початком випробувань необхідно виконати наступні операції:

– перевірити відповідність діаметра індентора та притискної лапки вимогам чинного стандарту випробування;



лапкою вгору;

– демонтувати притискну лапку 19 та індентор 2;

– обережно витягнути шток 4 разом із вантажем 5;

– промити напрямні втулки та поверхні штока, що труться, спиртом або бензином. За наявності дрібних подряпин на штоку їх дозволяється усувати поліруванням повстяним кругом із застосуванням полірувальної пасти (наприклад, пасти ГОІ). Застосування наждачного паперу категорично забороняється. Після полірування шток необхідно ретельно промити. Наявність залишків полірувальної пасти або мастила не допускається.

– встановити шток із вантажем на місце та зібрати навантажувальний пристрій у зворотній послідовності.

Стійку 13, кулачок 14 та штовхач 11 необхідно змащувати тонким шаром мастила ЦИАТИМ-201 не рідше одного разу на шість місяців, попередньо видаливши старе мастило бензином за відповідним стандартом.

					ВР 509.00.00.000. ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

### 3.1 Особливості повірки твердоміра

Повірку твердоміра здійснює відомча метрологічна служба підприємства-експлуатанта з віднесенням приладу до категорії нестандартних засобів вимірювальної техніки. Метрологічний контроль проводиться з метою підтвердження відповідності його метрологічних характеристик установленим вимогам нормативної документації та забезпечення достовірності результатів вимірювань [20].

Періодичність проведення повірки встановлюється один раз на рік. За результатами виконаних робіт оформлюється відповідний акт (свідоцтво) про повірку або висновок щодо придатності/непридатності приладу до подальшої експлуатації. У разі виявлення відхилень, що перевищують допустимі норми, твердомір підлягає регулюванню, ремонту або виведенню з експлуатації з подальшою повторною повіркою.

#### 3.1.1 Операції повірки

Під час проведення повірки необхідно виконати комплекс операцій, перелік яких наведено в таблиці 3.1 [1].

Таблиця 3.1 – Операції повірки [1]

Найменування операції	Номер пункту	Обов'язковість проведення під час:		Примітка
		ремонту	експлуатації	
1. Зовнішній огляд	3.2.1	Так	Так	
2. Випробування	3.2.2	Так	Так	
3. Визначення метрологічних характеристик:	3.2.3			
3.1. Визначення діаметра індентора		Так	Ні	При заміні індентора
3.2. Визначення випробувального навантаження	3.2.4	Так	Так	
3.3. Визначення похибки переміщення індентора	3.2.5	Так	Так	
3.4. Визначення розмірів притискної лапки	3.2.6	Так	Ні	При заміні лапки



метрологічними характеристиками, що не гірші за наведені (за показниками похибки та діапазону вимірювання). Усі застосовані засоби вимірювання повинні мати чинні свідоцтва про повірку або бути атестованими в установленому законодавством порядку.

### 3.1.3. Умови повірки

Під час проведення повірки твердоміра необхідно забезпечити дотримання встановлених умов навколишнього середовища та параметрів живлення, що гарантують стабільність метрологічних характеристик приладу.

Умови проведення повірки:

- температура навколишнього повітря повинна становити  $(23 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- відносна вологість повітря – не більше 80%;
- напруга живлення –  $(220 \pm 22) \text{ В}$  (або відповідно до технічної документації на прилад) частотою  $(50 \pm 1) \text{ Гц}$ .

Недотримання зазначених умов може призвести до збільшення похибки вимірювань та спотворення результатів повірки.

Перед початком повірочних робіт необхідно виконати комплекс підготовчих операцій, спрямованих на забезпечення справного технічного стану приладу:

- провести очищення та промивання напрямних втулок штока з метою видалення забруднень, пилу та залишків мастильних матеріалів;
- виконати технічне обслуговування приладу, зокрема перевірити стан механічних вузлів та здійснити змащення тертьових поверхонь відповідно до вимог експлуатаційної документації.

Після виконання підготовчих операцій необхідно переконатися у роботоздатності приладу та відсутності видимих механічних пошкоджень перед початком безпосередньої повірки.

## 3.2 Проведення випробувань твердоміра

### 3.2.1 Зовнішній огляд.

Під час проведення зовнішнього огляду здійснюють перевірку комплектності твердоміра відповідно до даних, зазначених у його паспорті та експлуатаційній документації. Наявність усіх складових частин, приладдя та супровідних документів є обов'язковою умовою допуску приладу до повірки.

Поверхні твердоміра не повинні мати механічних пошкоджень, тріщин, сколів, слідів корозії або інших дефектів, що можуть впливати на його зовнішній стан, безпечність експлуатації чи точність вимірювань.

Кулька індентора, притискні лапки та робочий стіл повинні бути чистими, без забруднень, залишків мастильних матеріалів, а також без видимих неозброєним оком пошкоджень і ознак корозії. Особливу увагу приділяють стану поверхні кульки індентора, оскільки її дефекти можуть суттєво вплинути на результати вимірювання твердості. Індентор має бути надійно та жорстко закріплений у штоку, без люфтів і перекосів, що забезпечує правильність прикладання навантаження та достовірність отриманих результатів.

### 3.2.2 Випробування.

Під час випробування перевіряють правильність функціонування та взаємодію рухомих вузлів і механізмів твердоміра відповідно до вимог інструкції з експлуатації. У вихідному (піднятому) положенні кулька індентора повинна розташовуватися вище площини притискної лапки (рис. 3.1), що забезпечує коректне встановлення зразка та запобігає його передчасному контакту з індентором. Навантажувальний механізм повинен переміщуватися плавно під час повороту кулачка, без ривків, заїдань або сторонніх шумів. Рух має бути рівномірним, що гарантує стабільність прикладеного навантаження та достовірність результатів вимірювання твердості. У разі виявлення порушень плавності ходу прилад підлягає регулюванню або технічному обслуговуванню до початку проведення повірки [1].





Отримані значення порівнюють із нормативними параметрами, наведеними в технічній документації на твердомір. У разі відхилення фактичного навантаження від допустимих меж виконують регулювання навантажувального механізму з подальшою повторною перевіркою.

Переведення показів ваг (значення маси) в одиниці сили навантаження здійснюють із використанням співвідношення між масою та силою тяжіння. Розрахунок виконують за формулою (3.1):

$$F = m \cdot g, \quad (3.1)$$

де  $F$  – сила навантаження, Н;

$m$  – покази ваг (маса), кг;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup> (приймається  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>).

Якщо покази ваг подані в грамах, попередньо необхідно перевести їх у кілограми ( $1 \text{ г} = 0,001 \text{ кг}$ ), після чого виконати обчислення за наведеною формулою.

Отримане значення сили навантаження порівнюють із номінальним значенням, установленим технічними характеристиками твердоміра, та визначають відхилення фактичного навантаження від заданого.

Визначення величини навантаження виконують не менше трьох разів із подальшим обчисленням середнього арифметичного значення. Усі отримані результати вимірювань та розрахунків заносять до протоколу повірки із зазначенням умов проведення вимірювань і застосованих засобів контролю.

Твердомір вважають придатним до експлуатації, якщо:

- середнє арифметичне значення трьох вимірювань відповідає встановленим технічним вимогам;
- максимальне відхилення окремого результату від середнього арифметичного не перевищує подвоєного значення допустимого відхилення (допуску) на навантаження.

					ВР 509.00.00.000. ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Основне навантаження визначають за результатами вимірювання попереднього та загального навантажень за формулою (3.2):

$$P_{oc}=P_{заг} - P_{non} \quad (3.2)$$

де  $P_{заг}$  – середнє арифметичне значення загального навантаження, Н;

$P_{non}$  – середнє арифметичне значення попереднього навантаження, Н.

Для визначення навантаження на притискну лапку виконують зважування навантажувального пристрою, після чого розрахунок здійснюють за формулою (3.3):

$$P_{н.л.}=9,81(m_{н.у.} - 0,58) \quad (3.3)$$

де  $P_{н.л.}$  – навантаження на притискну лапку, Н;

$m_{н.у.}$  – маса навантажуючого пристрою;

0,58 – маса вантажу, штока, кільця.

Результати розрахунків округлюють до 0,1 Н. Отримане значення навантаження на притискну лапку повинно відповідати вимогам нормативно-технічної документації. У разі невідповідності проводять регулювання або технічне обслуговування приладу з подальшою повторною перевіркою.

### 3.2.5 Визначення похибки вимірювання переміщення індентора

Похибку вимірювання переміщення індентора визначають із застосуванням кінцевих плоскопаралельних мір довжини відповідно до схеми, наведеної на рисунку 3.3 [1].

Для проведення вимірювань на основу 5 твердоміра під притискну лапку 6 встановлюють два однакові набори кінцевих мір 3 довжиною орієнтовно 10 мм. Під індентор 2 розміщують набір мір, довжина якого дорівнює довжині опорних блоків 3.



формулою (3.4):

$$\Delta = A_0 - A_1 - A, \quad (3.4)$$

де  $A_0$  – довжина блока кінцевих мір при установці нуля;

$A_1$  – довжина вимірюваного блоку кінцевих мір;

$A$  – покази відлікового пристрою твердоміра.

Для кожного значення  $A_1$  обчислюють середнє арифметичне похибки за результатами трьох вимірювань. Отримане середнє значення не повинно перевищувати гранично допустимих відхилень, наведених у таблиці 1.2. У разі перевищення допустимих значень твердомір підлягає регулюванню або ремонту з подальшою повторною перевіркою.

### 3.2.6 Визначення розмірів притискної лапки

Зовнішній та внутрішній діаметри притискної лапки визначають за допомогою штангенциркуля типу ШЦ-2 за ГОСТ 166 з діапазоном вимірювання 0-125 мм і ціною поділки ноніуса 0,1 мм. Вимірювання виконують по торцевій поверхні лапки щонайменше у двох взаємно перпендикулярних напрямках для контролю можливої овальності та відхилення форми.

Отримані результати порівнюють із нормативними значеннями, наведеними в таблиці 1.1. Значення зовнішнього та внутрішнього діаметрів повинні перебувати в установлених межах допусків. У разі виявлення відхилень, що перевищують допустимі значення, притискна лапка підлягає заміні або відновленню з подальшою повторною перевіркою.

### 3.2.7. Визначення похибки вимірювання за стандартними зразками

У процесі експлуатації рекомендується періодично здійснювати перевірку твердоміра із застосуванням стандартних зразків твердості, що постачаються разом із приладом або за окремим замовленням. Така перевірка має комплексний характер, оскільки дозволяє оцінити сумарний вплив усіх факторів, що впливають на результат вимірювання (стан індентора, величину





## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено комплекс науково-технічних та інженерних завдань, спрямованих на дослідження, удосконалення та метрологічне забезпечення твердоміра ТШ-ISO-2 для визначення твердості еластомерних матеріалів за методом IRHD.

1. Описано технічну характеристику та службове призначення твердоміра ТШ-ISO-2. Встановлено, що прилад призначений для вимірювання твердості гум та інших еластомерів у міжнародних одиницях IRHD шляхом визначення глибини вдавлювання сферичного індентора під дією нормованого навантаження. Проаналізовано його основні технічні параметри, діапазон вимірювань, точність, складові механічної та електронної частин, що забезпечують стабільність і відтворюваність результатів.

2. Проведено аналіз існуючих аналогів засобів вимірювання твердості еластомерів, зокрема твердомірів за методом Шора (типи А, D та інші). Визначено їх переваги (простота конструкції, оперативність контролю, портативність) і недоліки (залежність результатів від оператора, менша відтворюваність, вплив товщини зразка). Обґрунтовано, що метод IRHD забезпечує вищу точність і стабільність результатів, що особливо важливо для лабораторного та сертифікаційного контролю.

3. Розкрито принцип роботи твердомірів для контролю твердості гумових зразків та описано фізичні перетворення, покладені в основу їх дії. Показано, що вимірювання базується на взаємозв'язку між прикладеним навантаженням та глибиною пружнопластичного вдавлювання індентора, а контроль мікропереміщень є визначальним чинником точності.

4. Розглянуто будову і принцип дії твердоміра ТШ-ISO-2, проаналізовано умови проведення вимірювань (температура, вологість, стабільність живлення, стан поверхні зразка) та їх вплив на похибку. Встановлено, що відхилення від нормованих умов можуть призводити до систематичних і випадкових похибок,

					ВР 509.00.00.000. ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

пов'язаних зі зміною пружно-еластичних властивостей матеріалу та нестабільністю електронної частини.

5. Розроблено кінематичну схему твердоміра ТШ-ISO-2, що відображає взаємодію навантажувального механізму, штока, індентора та вимірювального вузла. Описано принцип передачі механічного переміщення індентора до первинного вимірювального перетворювача та формування відліку.

6. Досліджено структурну схему електронної частини твердоміра та проаналізовано повний цикл перетворення сигналу: від механічного переміщення індентора до формування цифрового значення твердості IRHD. Встановлено, що точність вимірювання визначається стабільністю живлення, параметрами підсилювального тракту, роздільною здатністю аналого-цифрового перетворювача та алгоритмом цифрової обробки.

7. Досліджено конструкцію та принцип дії індуктивного давача як первинного вимірювального перетворювача. Проаналізовано залежність диференційної напруги від переміщення осердя, оцінено лінійність характеристики в робочому діапазоні, чутливість та завадостійкість. Встановлено вплив геометричних параметрів котушок, довжини магнітопроводу, зазору, температурних факторів та електромагнітних завад на точність вимірювання мікропереміщень індентора.

8. Виконано інженерний розрахунок електронного блоку твердоміра, що дозволило обґрунтувати вибір елементної бази, параметри підсилення, частотні характеристики та умови забезпечення необхідної точності перетворення сигналу.

9. Проаналізовано порядок підготовки твердоміра до роботи після транспортування або тривалого зберігання, а також регламент технічного обслуговування. Доведено, що стан напрямних вузлів, правильність змащування, температурна стабілізація та коректність встановлення навантажень безпосередньо впливають на метрологічну надійність і відтворюваність результатів вимірювання.

10. Розроблено методику повірки твердоміра ТШ-ISO-2, яка включає перевірку геометричних параметрів індентора та притискної лапки, контроль випробувальних навантажень, визначення похибки переміщення індентора та перевірку за стандартними зразками твердості. Запропонована методика забезпечує комплексний метрологічний контроль і дозволяє об'єктивно оцінити придатність приладу до експлуатації.

Таким чином, у роботі комплексно досліджено конструктивні, метрологічні та експлуатаційні особливості твердоміра ТШ-ISO-2, обґрунтовано його параметри та розроблено рекомендації щодо забезпечення точності й надійності вимірювання твердості еластомерних матеріалів за методом IRHD. Отримані результати можуть бути використані в практиці метрологічних служб підприємств та випробувальних лабораторій, що здійснюють контроль якості гумотехнічних виробів.

					ВР 509.00.00.000. ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		



звернення: 15.03.2026).

12. Твердість TPU: класифікація за шкалами Shore A і Shore D. URL: <https://surl.li/jdhetl> (дата звернення: 20.03.2026).

13. Перевірка якості гумових матеріалів. URL: <https://surl.li/dwkhpt> (дата звернення: 25.03.2026).

14. Основи матеріалознавства. Неметалеві матеріали. URL: <https://surl.li/ywewhy> (дата звернення: 01.04.2026).

15. Таблиця шкали твердості за Шором. URL: <https://surl.li/kwrdrf> (дата звернення: 01.04.2026).

16. Сусліков Л. М., Студеняк І. П. Первинні вимірювальні перетворювачі фізичних величин: навч. посіб. URL: <https://surl.lu/xkuvkl> (дата звернення: 10.04.2026).

17. Тичков В. В., Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В., Базіло К. В. Автоматизація виробничих процесів. Технічні засоби автоматизації: навч.-метод. посіб. URL: <https://surl.li/bjsjat> (дата звернення: 10.04.2026).

18. Защепкіна Н. М. Метрологія: навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.

19. Долгов О. М. Колосов Д. Л. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів: навч. посіб. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2022. 70 с.

20. Метрологічне забезпечення виробництва згідно з ISO 9001:2015. URL: <https://surl.li/bcqfsx> (дата звернення: 30.04.2026).

					ВР 509.00.00.000. ПЗ	Лист
Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		