

**Міністерство освіти і науки України**  
**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

На правах рукопису

**МИНДЮК ВАЛЕНТИН ДМИТРОВИЧ**

УДК 620.179

**РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ ЯКІСНИХ ЗМІН МАТЕРІАЛІВ  
НАФТОГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА КОМПЛЕКСОМ ФІЗИЧНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК**

**Спеціальність 05.15.12 – Машини нафтової і газової промисловості**

**Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук**

**Науковий керівник:**  
**Карпаш Олег Михайлович**  
**доктор технічних наук, професор**

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>5</b>
 <b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ</b>	
<b>ПАРАМЕТРІВ МІКРОСТРУКТУРИ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ</b>	
<b>НАФТОГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ.....</b>	
	<b>13</b>
1.1 Характеристика об'єкта досліджень.....	13
1.2 Аналіз методів контролю мікроструктури конструкційних сталей...	25
1.2.1 Акустичні методи структуроскопії сталей.....	26
1.2.2 Магнітні методи структуроскопії сталей.....	30
1.2.3 Електромагнітний контроль мікроструктури.....	34
1.2.4 Електричні методи структуроскопії сталей.....	37
1.2.5 Електрохімічні методи контролю властивостей металів.....	41
1.2.6 Тепловий метод контролю дефектів мікроструктури.....	42
1.2.7 Металографічні та фрактографічні методи.....	45
1.3 Вибір та обґрунтування напрямку подальших досліджень.....	46
 <b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЗМІН В МІКРОСТРУКТУРІ І ПОВ'ЯЗАНИХ З</b>	
<b>НИМИ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВІВ.....</b>	
	<b>49</b>
2.1 Дослідження особливостей фазових перетворень в гетерогенних	
сплавах та властивостей твердих розчинів.....	50
2.2 Дослідження властивостей гетерогенних сплавів.....	51
2.3 Дослідження особливостей зміни структурночутливих властивостей	
внаслідок фазових перетворень.....	53
2.3.1 Дослідження зміни структурночутливих магнітних	
властивостей.....	53
2.3.2 Дослідження зміни структурночутливих електричних	
властивостей.....	56

2.3.3 Дослідження змін структурночутливих температурних властивостей.....	61
2.4 Структурна чутливість фізичних характеристик гетерогенних сплавів.....	62
Висновки до розділу 2.....	63
<b>РОЗДІЛ 3</b>	
<b>ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ВСТАНОВЛЕННЯ АНАЛІТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ПАРАМЕТРАМИ МІКРОСТРУКТУРИ І ФІЗИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ СТАЛЕЙ.....</b>	
3.1 Вимірювання фізико-механічних характеристик досліджуваних сталей.....	67
3.1.1 Вимірювання твердості.....	67
3.1.2 Вимірювання індуктивного магнітного параметра.....	67
3.1.3 Вимірювання коерцитивної сили.....	68
3.1.4 Вимірювання теплопровідної характеристики.....	69
3.1.5 Вимірювання питомого електричного опору металу зразків...70	
3.2 Технічні засоби для вимірювання фізичних інформативних параметрів.....	71
3.3 Металографічні дослідження для визначення кількісних параметрів мікроструктури.....	74
3.4 Методика обробки мікрофотознімків для визначення параметрів мікроструктури.....	77
3.5 Аналіз та опрацювання результатів досліджень.....	82
3.6 Отримання аналітичних залежностей між параметрами контролю..90	
Висновки до розділу 3.....	99
<b>РОЗДІЛ 4</b>	
<b>РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ЯКІСНИХ ЗМІН СТАЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ НАФТОГАЗОВГО ОБЛАДНАННЯ ЗА СТАНОМ ЇХ МІКРОСТРУКТУРИ.....</b>	
4.1 Метод оцінювання стану мікроструктури.....	106

4.1.1 Методи вимірювань.....	107
4.1.2. Засоби вимірювань.....	108
4.1.3 Умови вимірювань.....	109
4.1.4 Підготовка до виконання вимірювань.....	110
4.1.5 Проведення вимірювань та оброблення результатів.....	111
4.2 Промислова апробація розробленого методу.....	114
Висновки до розділу 4.....	119
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>120</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>123</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>135</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Питання оцінки фактичного технічного стану елементів обладнання та металоконструкцій у нафтогазовій промисловості стає особливо актуальним в умовах гострої потреби у продовженні терміну експлуатації об'єктів, що відпрацювали свій нормативний ресурс. Ресурс безпечної експлуатації обладнання залежить і від фактичного стану мікроструктури та фізико-механічних властивостей металу.

Деградація властивостей конструкційних сталей в процесі експлуатації є одним з основних чинників, що обмежує тривалість служби елементів обладнання. Часто вона зумовлена сукупним впливом на металеві матеріали механічного навантаження та зовнішнього середовища, що викликає в ньому поступове накопичення пошкоджень, які погіршують параметри якості сталей.

Параметри мікроструктури є одними із основних властивостей, що характеризують якість металевих матеріалів. Мікроструктура металу впливає на його основні фізичні та механічні властивості, що забезпечують експлуатаційні властивості.

Оскільки зміні механічних властивостей металу обладнання в процесі експлуатації передують зміни в його мікроструктурі, то контроль процесів деградації властивостей металів з часом та розробка методів оцінки їх величини у заданих умовах експлуатації є актуальною проблемою як у науковому, так і технічному плані. Актуальність задач контролю технічного стану металевих матеріалів нафтогазового обладнання пов'язана ще й з тим фактом, що діючі нормативно-технічні документи при розрахунку залишкового ресурсу устаткування не враховують рівень деградації властивостей металу в процесі експлуатації, що істотно знижує достовірність прогнозу.

Тому, розроблення нових підходів для проведення експлуатаційного контролю технічного стану елементів нафтогазопромислового обладнання за станом мікроструктури металу із збереженням цілісності об'єкту контролю є актуальною на сьогодні науково-технічною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалась за особистою участю як виконавця автора на кафедрі технічної діагностики та моніторингу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу відповідно до плану наступних науково-дослідних робіт:

- держбюджетна Д-2-07-Ф «Дослідження нових методів визначення фактичних фізико-механічних властивостей металоконструкцій тривалої експлуатації неруйнівними методами» (№ держреєстрації 0107U001559);
- госпдоговірна НЧ/409/2007 «Розроблення нових методів та технічних засобів визначення фізико-механічних характеристик технологічних об'єктів довготривалої експлуатації для створення банків даних про фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів» (№ держреєстрації 0107U008068);
- госпдоговірна № НУ/7-2011 «Розроблення та впровадження енергоефективних технологій на діючих енергоємних об'єктах нафтогазового комплексу» (0111U008841) в рамках виконання Державної науково-технічної та соціальної програми «Наука в університетах 2008-2017»;
- держбюджетна Д-11-11-П «Розроблення новітніх неруйнівних методів діагностики та моніторингу деградації матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації» Міносвіти та науки №0111U002999;
- держбюджетна Д-1-13-Ф «Розроблення наукових основ багатопараметрового контролю технічного стану металоконструкцій довготривалої експлуатації за фактичними значеннями фізико-механічних характеристик їх матеріалу та типом і розмірами дефектів» Міносвіти та науки №0113U001099.

**Метою дисертаційної роботи** є вирішення актуальної науково-практичної задачі в галузі удосконалення методів оцінювання технічного стану матеріалів нафтогазового обладнання в процесі їх експлуатації шляхом розроблення методу оцінки якісних змін його металевого матеріалу за комплексом фізичних параметрів.

**Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити такі задачі:**

- проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку засобів і технології контролю фізико-механічних характеристик конструкційних сталей для обладнання нафтогазової галузі;
- встановити характер взаємозв'язку між параметрами мікроструктури (середній діаметр зерна та співвідношення структурних складових (перліт/ферит) і фізичними властивостями (магнітними, електричними, теплопровідними) конструкційних вуглецевих доєвтектоїдних сталей для нафтогазового обладнання, що реагують на зміни в мікроструктурі;
- провести експериментальні дослідження з метою визначення вказаних кількісних параметрів мікроструктури з мікрошліфів досліджуваних марок сталей та визначення оптимальної кількості з запропонованих інформативних фізичних параметрів неруйнівного контролю з подальшим встановленням кореляційних зв'язків між ними;
- розробити технологію оцінки фактичного технічного стану металу трубних елементів усіх типорозмірів, резервуарів для зберігання нафти та нафтопродуктів, каркасів та арматури бурових веж, привідних та проміжних валів, гаків та гальмівних елементів (шківів та барабанів) бурових установок та рами верстатів-гойдалок за дійсними значеннями параметрів мікроструктури, що визначаються за комплексом фізичних структурночутливих параметрів досліджуваних марок сталей та провести її промислову апробацію.

**Об'єктом досліджень** є процес контролю якості конструкційних сталей елементів нафтогазового обладнання за станом мікроструктури та її зміни в процесі експлуатації обладнання.

**Предметом дослідження** є методи оцінки якості металевих матеріалів елементів нафтогазового обладнання за станом їх мікроструктури.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених задач і досягнення поставленої мети в дисертації використано методи теоретичного аналізу фізичних явищ в матеріалі, пов'язаних з мікроструктурними перетвореннями,

етоди аналітичного моделювання, методи кореляційного та регресійного аналізу, інтерполяція даних, методи штучних нейронних мереж ( далі – ШНМ), методи ідентифікації образів. Експериментальні дослідження щодо методу оцінювання якості конструкційних сталей за станом їх мікроструктури та узагальнення результатів здійснювались із застосуванням теорії вимірювань і планування експерименту, кореляційного і регресійного аналізу, математичної статистики і теорії ймовірності, методів числового оброблення результатів експерименту, створення і адаптації алгоритмів штучних нейронних мереж для нелінійної апроксимації параметрів мікроструктури як функції кількох параметрів неруйнівного контролю.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Науковий результат дисертації полягає у новому методі кількісної оцінки якості конструкційних сталей елементів обладнання для буріння, експлуатації свердловин та зберігання нафтопродуктів за дійсним станом їх мікроструктури. Наукова новизна визначається такими положеннями:

1. Вперше запропоновано здійснювати оцінювання кількісних параметрів мікроструктури конструкційних сталей шляхом комплексного використання визначеної оптимальної кількості фізичних параметрів контролю.

2. Вперше встановлено якісні та кількісні взаємозв'язки між параметрами мікроструктури: співвідношенням структурних складових перліт/ферит та середнім діаметром зерна, та фізико-механічними властивостями: твердістю, коерцитивною силою та частотою електромагнітних коливань індукційного перетворювача, що дозволяє чисельно ідентифікувати переважаючу структурну складову в доєвтектоїдних вуглецевих та низьколегованих конструкційних сталях.

3. Удосконалено методологію оцінки металографічних мікрофотографій із використанням відкритого програмного забезпечення ImageJ з можливістю індивідуальної модифікації процедури обробки мікроструктурних зображень в залежності від їх якості.

4. Набув подальшого розвитку метод оцінювання фактичного технічного стану конструкційних сталей за станом мікроструктури, що дозволяє рахувати зміни в мікроструктурі в розрахунку фактичних значень механічних характеристик сталей.

**Положення, які захищаються:**

1. Метод оцінки якісних змін властивостей сталей елементів нафтогазового обладнання за станом їх мікроструктури на базі використання оптимального комплексу структурночутливих фізичних параметрів контролю.

2. Аналітичні залежності між параметрами мікроструктури конструкційних сталей: співвідношення перліт/ферит та середній діаметр зерна та фізико-механічними властивостями сталей: твердість, коерцитивна сила та індуктивний параметр, що визначається частотою електромагнітних коливань індуктивного перетворювача, що дозволяє чисельно ідентифікувати переважаючу структурну складову в сплаві.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в реалізації розробленого методу оцінювання якості металевих матеріалів за результатами контролю їх структурночутливих фізичних властивостей при обстеженні і оцінюванні технічного стану елементів обладнання для буріння та експлуатації свердловин, транспортування та зберігання продуктів нафтогазовидобутку.

**Практичне застосування отриманих результатів** полягає в наступному:

1. Розроблено метод оцінювання якості конструкційних сталей елементів обладнання для буріння та експлуатації свердловин за станом мікроструктури та її зміни з часом на основі неруйнівного контролю їх фізичних властивостей.

2. Розроблено положення нормативних документів СОУ, що регламентують порядок виконання робіт і оброблення отриманих результатів для визначення кількісних ознак деградації властивостей конструкційних сталей.

3. Розроблена та впроваджена в дослідну експлуатацію методологія автоматизованої оцінки одержаних мікрофотознімків з допомогою доступної

відкритої програми-аналізатора ImageJ дала змогу підвищити точність визначення регламентованих чинними нормативними документами кількісних параметрів мікроструктури і розширити область досліджуваних мікроструктур.

4. Розроблений метод оцінювання фактичного стану мікроструктури конструкційних сталей дає можливість уточнювати розрахунок механічних характеристик елементів нафтогазового устаткування, що працює в умовах циклічних навантажень, із урахуванням кількісних параметрів мікроструктури і проводити моніторинг зміни характеристик матеріалів з часом.

5. Результати роботи, напрацьовані в процесі дисертаційних досліджень, проваджені в навчальний процес кафедри ТДіМ ІФНТУНГ для спеціальностей «Обладнання нафтових і газових промислів», «Буріння нафтових і газових свердловин», «Технологія та устаткування зварювання».

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Зокрема, в опублікованих у співавторстві роботах здобувачем:

- встановлені особливості прояву змін мікроструктури та пов'язаних з нею фізичних параметрів конструкційних сталей для нафтогазового обладнання в процесі їх експлуатації [42];

- запропоновано новий підхід до визначення фактичних значень кількісних параметрів мікроструктури доєвтектоїдних конструкційних вуглецевих та низьколегованих сталей, який передбачає врахування кількох фізичних параметрів [76];

- розроблено методику визначення кількісних параметрів мікроструктури за результатами оптичної металографії із застосуванням відкритого програмного забезпечення ImageJ [78];

- розроблено методику та проведено комплекс експериментальних досліджень з визначення оптимальної кількості фізичних інформативних параметрів контролю, які найкраще корелюють з кількісними параметрами мікроструктури [77];

- розроблено метод визначення кількісних параметрів мікроструктури за результатами контролю фізичних властивостей зразків марок конструкційних сталей для елементів нафтогазового обладнання та трубних конструкцій [77, 8];
- запропоновано практичну реалізацію та проект нормативного забезпечення методу оцінки характеру мікроструктурних змін конструкційних сталей в процесі експлуатації [59].

**Апробація результатів роботи.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на вітчизняних і міжнародних конференціях, зокрема: Міжнародній науково-технічній конференції «Міцність та надійність магістральних трубопроводів» („MT-2008”), м. Київ, червень 2008 р.; 5-й Міжнародній науково-технічній конференції і виставці «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», м. Івано-Франківськ, грудень 2008 р.; II Всеукраїнській конференції молодих вчених «Сучасне матеріалознавство: матеріали та технології» СММТ – 2011, Україна, м. Київ, листопад 2011 р.; 16-й Міжнародній науково-технічній конференції «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів», м. Славське, Львівської обл., лютий 2012 р.; Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу», м. Івано-Франківськ, травень 2012 р.; «NDT days 2012»/«SCIENTIFIC PROCEEDINGS», г. Созополь, Болгарія, июнь 2012 г.; 7-й Національній науково-технічній конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2012» /Київ: УТ НКТД, 2012 р.; III Міжнародній науково-технічній конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування», м. Тернопіль, вересень 2013 р.

**Публікації результатів досліджень.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 12 друкованих праць, з них 6 – статті у фахових наукових виданнях, затверджених МОН України, в тому числі 2 входять до міжнародних

укометричних баз, 2 – зарубіжні публікації, 4 – тези доповідей на конференціях, у тому числі 3 – міжнародні.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 122 сторінках. Крім того, робота проілюстрована 28 рисунками, включає 14 таблиць, список використаних джерел із 107 найменувань та 12 додатків.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІКРОСТРУКТУРИ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ НАФТОГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ

### 1.1 Характеристика об'єкта досліджень

Більшість вузлів та елементів устаткування та інструменту газових і нафтових промислів працюють у вкрай важких умовах, піддаючись впливу статичних знакозмінних і динамічних навантажень, інтенсивному абразивному износу та корозії. Дуже важкі умови роботи устаткування і інструменту нафтової і газової промисловості призводять до передчасного зношування і руйнування основних деталей цього устаткування.

Недостатня довговічність устаткування викликає необхідність знижувати навантаження на окремі вузли і деталі, збільшувати їх вагу і габарити, проводити додаткові витрати на виготовлення запасних деталей і ремонт устаткування.

Питання оцінки фактичного технічного стану вузлів і елементів обладнання нафтових і газових промислів стає особливо актуальним в умовах гострої потреби у продовженні терміну експлуатації об'єктів, що відпрацювали свій нормативний ресурс. Ресурс безпечної експлуатації обладнання залежить також і від фактичного стану мікроструктури та фізико-механічних властивостей металу. Вплив корозійно-активних середовищ, коливання температури, робочих навантажень та напружень призводять з часом до деградації структури та зміни властивостей експлуатованого металу (рисунки 1.1).



Рисунок 1.1 – Основні чинники, що впливають на довговічність елементів обладнання

Практика експлуатації нафтогазового обладнання [1] дає можливість виділити наступні головні причини накопичення дефектів і пошкоджень, що призводять до відмов устаткування з часом його експлуатації:

наскрізні тріщини, руйнування і деформації елементів устаткування, що виникають при перевищенні допустимих напружень;

механічне зношування, обумовлене тертям спряжених поверхонь;

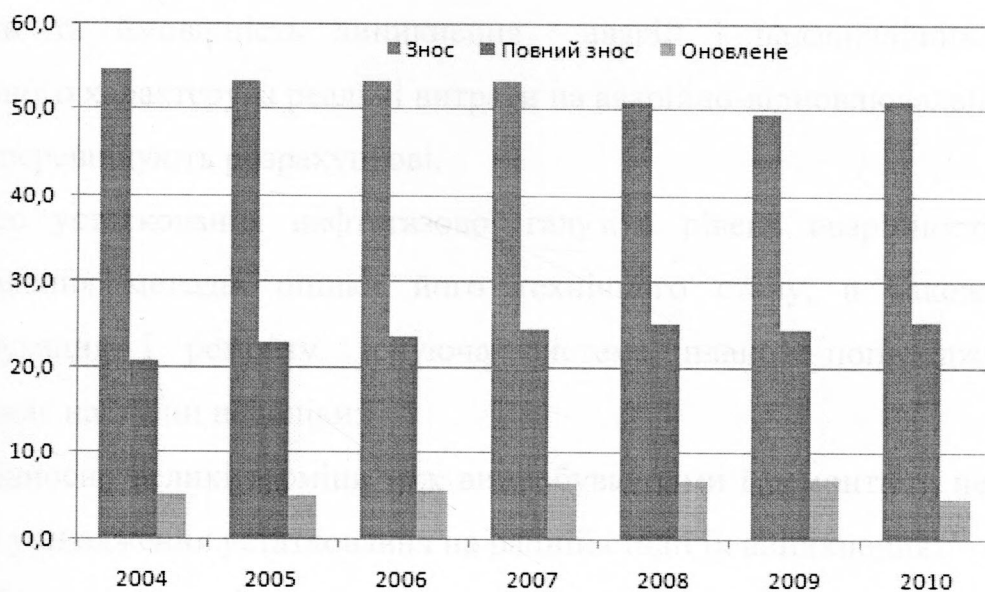
ерозійно-кавітаційні пошкодження, викликані дією потоку рідини або газу;

деградація властивостей матеріалів з часом і під дією експлуатаційних чинників;

корозія металів і сплавів, корозійно-механічні пошкодження, корозії, що виникають під впливом, напружень, тертя і тому подібне

Аналіз фонду експлуатованого обладнання [2] свідчить про те, що міра зносу устаткування організацій нафтогазової галузі на кінець 2010 року складає

,1 %, питома вага повністю зношеного устаткування - 25,6 %, коефіцієнт оновлення - 4,9 % (рисунок 1.2).



	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Знос	54,8	53,3	53,3	53,4	50,9	49,6	51,1
Повністю зношене обладнання	20,8	23,0	23,8	24,7	25,3	24,6	25,6
Коефіцієнт оновлення	5,3	5,1	5,8	6,6	6,9	7,1	4,9

Рисунок 1.2 – Стан основних фондів нафтогазової галузі

Аналіз причин виникнення аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру за останні роки показав, що майже у половині випадків (48%) вони мають технічний характер (незадовільний технічний стан споруд, конструкцій, обладнання та інженерних мереж, їх значна зношеність унаслідок закінчення нормативного терміну експлуатації – нормативного ресурсу). За підрахунками спеціалістів, спрацювання зазначених об'єктів у нафтогазовій галузі складає 50-70 % і має тенденцію до зростання.

Через складний економічний та фінансовий стан більшості суб'єктів нафтогазового комплексу, значне подорожчання будівництва і введення в експлуатацію нових об'єктів, високу вартість і трудомісткість їх заміни практично припинилося оновлення основних фондів. Капітальний і поточний

ремонт споруд, конструкцій, обладнання та інструменту проводиться нерегулярно, внаслідок чого зростає спрацьованість цих об'єктів, ступінь їх небезпеки та ймовірність виникнення аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру, а реальні витрати на аварійно-відновлювальні роботи у 2-3 рази перевищують розрахункові.

Знос устаткування нафтогазової галузі і рівень аварійності вимагає удосконалення методів оцінки його технічного стану, а також системи обслуговування і ремонту. Існуюча система планово-попереджувального ремонту має наступні недоліки:

- відносно великі терміни між випробуваннями і ремонтами не дозволяють виявляти ушкодження устаткування на ранній стадії їх виникнення;
- обслуговування і ремонт виконуються без фактичної їх необхідності;
- надійність роботи після обслуговування з розбиранням і заміною деталей часто знижується;
- необґрунтована фактичним станом заміна вузлів і деталей з значним залишковим ресурсом.

Перехід від регламентованих за часом профілактичних і ремонтно-відновлювальних робіт до обслуговування устаткування за фактичним технічним станом дозволить підвищити його ресурс і надійність, скоротити витрати на ремонт і простої. Будучи дорогим заходом система ремонту і обслуговування за технічним станом вимагає визначення найбільш пріоритетного устаткування, що вимагає підвищеного контролю.

З огляду на це забезпечення надійності та прогнозування технічного стану сталених елементів нафтогазового обладнання має надзвичайно велике практичне значення. Однак, в нормативно-технічних документах, що застосовуються при розрахунку залишкового ресурсу металоконструкцій, не враховується рівень мікроструктурної деградації матеріалів і конструкцій у процесі експлуатації, що істотно знижує достовірність прогнозу. Забезпечення безаварійної експлуатації обладнання можливе тільки на основі отримання й

аналізу об'єктивних інструментальних даних про фактичний стан матеріалів і конструкцій.

Тому особливо важливим науково-практичним завданням є всебічне вивчення мікроструктурних змін, що відбуваються в сталях нафтогазопромислового обладнання у процесі його тривалої експлуатації [3].

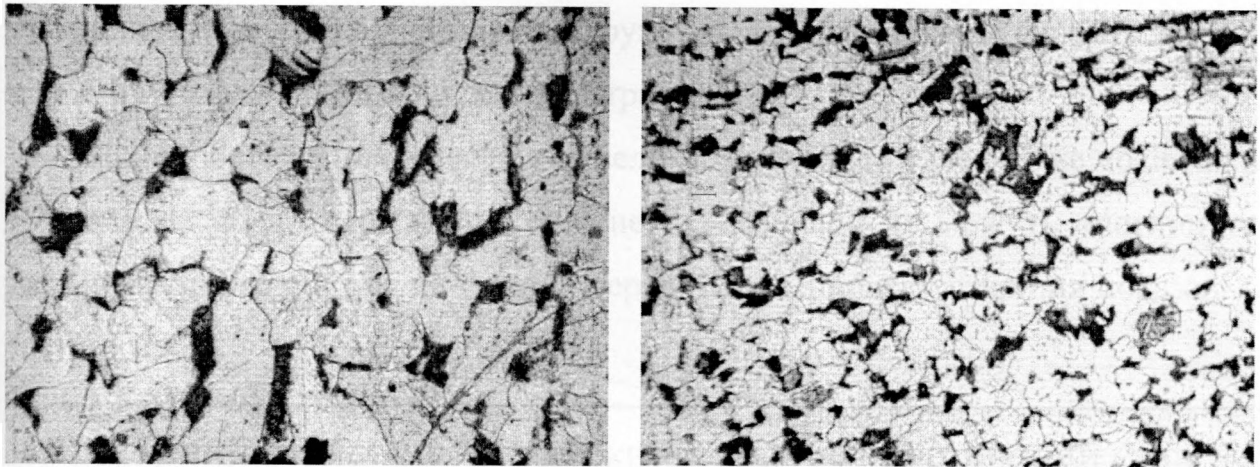
Вітчизняні та зарубіжні вчені за останні 50 років розвинули і постійно вдосконалюють методи, технології та засоби визначення фізико-механічних характеристик різних металевих матеріалів. При цьому порушувались питання аналізу змін фізико-механічних характеристик матеріалів у ході експлуатації, однак вивчення їх обмежилось теоретичними і лабораторними дослідженнями, результати яких відображені в працях Міхеєва М.Н., Горкунова Є.С., Біди Г.В., Карпаша О.М., Молодецького І.А., Карпаша М.О., Назарчука З.Т., Никифорчина Г.М., Крижанівського Є.І., Петрини Ю.Д., Тетерка А.Я., Шарка А.В., Рибачука В.Г., Білокура І.П., Дорофєєва А.Л., Сухорукова В.В. Kroning M., Z. Guo, W. Sha, M. Balazinski, M.Saka та ін. Однак всі існуючі методи не мають теоретичної бази для встановлення кількісних зв'язків параметрів структури із важливими фізичними чи механічними характеристиками. Практично всі залежності, які використовуються для контролю, мають емпіричний характер і часто дійсні тільки для однієї марки або типу матеріалу. Тому є необхідність у встановленні і вивченні ознак виражених мікроструктурних змін металевих матеріалів та розроблення методів і засобів для їх своєчасного виявлення.

Для виготовлення елементів обладнання для нафтогазової промисловості часто використовують конструкційні вуглецеві та низьколеговані сталі [4], в мікроструктурі яких здебільшого переважає ферито-перлітна та перлітна структури в залежності від марки сталі та виду її термообробки. Зокрема, значне поширення має сталь Ст.3, якісні конструкційні сталі 10, 15, 20, які при використанні для відповідальних і навантажених конструкцій легують марганцем. Для трубної арматури та резервуарів для зберігання нафти і нафтопродуктів використовують низьколеговані сталі 10Г2С, 09Г2С, 17Г2СФ, 14ХГС.

Одним з проявів граничних станів металоконструкцій з низьковуглецевих сталей, що працюють в інтервалі низьких температур, є так звана деградація механічних властивостей металу [5]. Зазвичай це виражається в зниженні пластичності, часто фіксується пониження міцнісних характеристик. Зниження, наприклад, тріщиностійкості в низьковуглецевих і низьколегованих сталях може бути пов'язане як з сегрегацією домішок по межах феритних зерен, так і з утворенням карбідних фаз. Очевидно, що подібні явища - суть прояву загального механізму старіння. Старіння металів виражається в зміні механічних, фізичних і хімічних властивостей металів і сплавів в процесі витримування та експлуатації. Старіння обумовлене термодинамічною нерівноважністю початкового стану і поступовим наближенням мікроструктури до рівноважного стану в умовах достатньої дифузійної рухливості атомів. Старіння в низьковуглецевих та низьколегованих сталях припускає наявність деякої залишкової пластичної деформації. Нагрівання до температур 200 – 250 °С додатково інтенсифікує цей процес.

Мікроструктура конструкційних низьковуглецевих і низьколегованих сталей, що використовуються часто для елементів тривало експлуатованого обладнання [6 - 8], у вихідному стані, як правило, являє собою структуру перліту і фериту, що відповідає нормалізованому стану (рисунок 1.3, а, б.).

Для цього типу структури характерна дрібнозернистість (бал феритного зерна варіюється в межах 7 – 10 балів), що пояснює хороше поєднання міцнісних і пластичних властивостей, одержаних при механічних випробуваннях цих сталей. Перлітні області складаються з декількох колоній невеликих розмірів з тонкопластинчастими прошарками цементиту. За незначного вмісту марганцю для мікроструктури характерна феритно-перлітна структура з часткою бейніту. Колонії тонкопластинчастого перліту і бейніту часто об'єднані в одну область. За морфологією бейніт можна віднести до високотемпературної форми.



а)

б)

Рисунок 1.3 – Структура сталей 10 (а) і 09Г2С (б) у нормалізованому стані.  
Збільшення 400<sup>x</sup>.

Хоча навантаження, що сприймаються металоконструкціями з низьколегованих і низьковуглецевих сталей значно менші статичної границі плинності, все ж таки тут протікають процеси мікропластичної деформації та пов'язаного з цим динамічного деформаційного та мікроструктурного старіння [3].

В низьковуглецевих сталях при кімнатній температурі нічого не відбувається з частками карбонітридів, що може забезпечити розпад перліту, а також нічого не відбувається з неметалічними включеннями. Таким чином, основні мікроструктурні складові низько вуглецевих сталей при кімнатній температурі стабільні.

Але один з елементів мікроструктури низьковуглецевих сталей є істотно нерівноважним. Йдеться про пересичений твердий розчин вуглецю в ґратках  $\alpha$ -заліза (фериту). У фериті при виготовленні листових заготовок за деякими технологіями створюється нерівноважна структура – пересичений твердий розчин вуглецю. Цей пересичений твердий розчин з часом розпадається з виділенням часток карбідів. Це і є процес старіння низьковуглецевих сталей.

У прокатуваних сталях, особливо в сталях контрольованого прокатування, в ґратках фериту створена дуже висока нерівноважна концентрація вуглецю, яка забезпечує високу міцність цієї сталі в стані

постачання. Але це нерівноважна структура, і надлишковий вуглець з часом «переміщується» з ґраток до дефектів ґраток [12].

Якщо пересичення вуглецем невелике, то вуглець увесь може «осісти» на дислокаціях. Якщо пересичення значне, і дислокації не можуть «поглинути» увесь вуглець, то він йде на границі зерен. Етапи процесу старіння показані на рисунку 1.4.

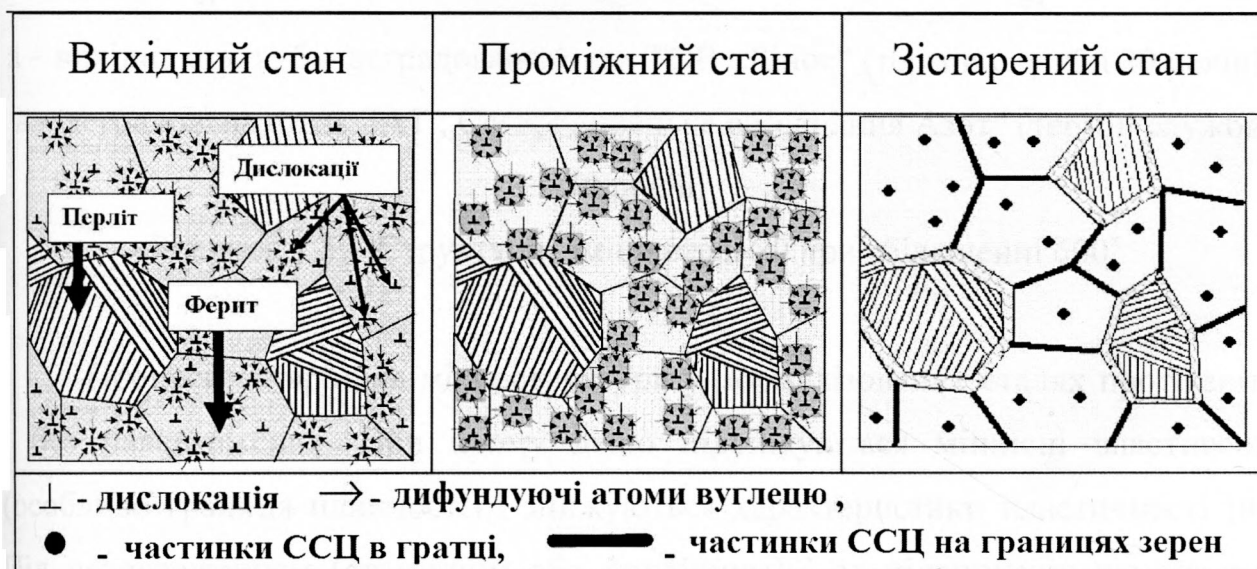
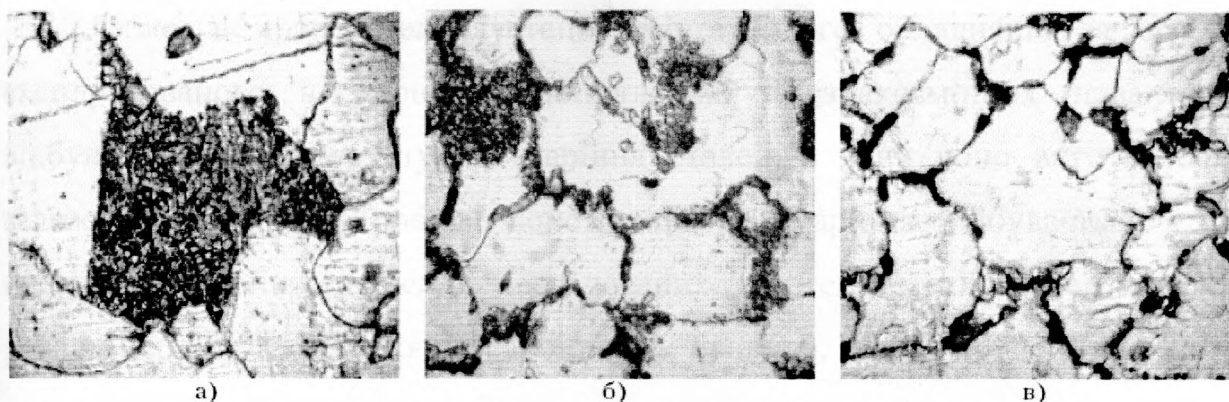


Рисунок 1.4 – Схема еволюції мікроструктури низьковуглецевих конструкційних сталей в процесі експлуатації

Детальним вивченням мікроструктури сталей даного класу у вихідному стані й після визначеного терміну експлуатації зафіксовано, що у вихідному стані (як уже було зазначено вище) в нормальній феритно-перлітній структурі вуглецевих сталей (рисунок 1.5, а) перліт має пластинчасту або зернисту будову [5]. У деградованій структурі, наприклад сталі 20, (рисунок 1.5. б, в) спостерігається виділення карбідної фази із фериту, карбідна складова перліту зміщується до границь зерен. Відбувається коагуляція карбідів, збільшується товщина границь зерен і кінцева структура являє собою ферит плюс карбідна сітка.



а – вихідна сталь; б – деградована сталь ТОВ „Лінос“ (термін служби 20 років);  
в – деградована сталь ЗАТ „Северодонецьке об’єднання Азот“ (термін служби  
30 років)

Рисунок 1.5 – Структурні зміни сталі 20 при збільшенні 600<sup>x</sup>

Процеси «старіння» мікроструктури у нормалізованих сталях протікають і без навантаження. При цьому дещо підвищуються міцнісні властивості (особливо границя плинності) і знижуються характеристики пластичності [8]. Під навантаженням (статичним або циклічним) і за підвищених температур експлуатації процеси динамічного деформаційного старіння інтенсифікуються [9, 10]. Оскільки процеси руху та «розмноження» дислокацій в локальних об’ємах металу протікають за напружень, значно менших статичної границі плинності, то і процеси деформаційного старіння у низьковуглецевих конструкційних сталях протікають при експлуатаційних навантаженнях. У роботах [8, 9] було показано, що статичне та динамічне деформаційне старіння в низьковуглецевій сталі при повторному розтягу спостерігається за напружень, значно менших границі плинності. Деформаційне зміцнення й старіння призводить також до зниження характеристик тріщиностійкості та ударної в’язкості. Крім того, відбуваються зміни величини границі плинності цього класу сталей, яка сильно залежить від розміру зерна, щільності дислокацій та об’ємної долі частинок вторинної фази [11]. Незначні зміни хімічного складу і виділення домішок у вигляді вторинних фаз на границях зерен призводять до значного зниження пластичності металу і зниження в’язкості руйнування в десятки разів.

Отже, в процесі експлуатації нафтогазового обладнання, а особливо експлуатованого в умовах малоциклових та знакозмінних навантажень, відбувається мікроструктурне старіння сталей, з яких воно виготовлене. В залежності від умов роботи конструкції це старіння відбувається у двох напрямках: у мікроструктурі деградованих доевтектоїдних сталей можливий розпад перліту та коагуляція карбідів (як правило, даний процес протікає при дещо підвищеній температурі), а також деградація властивостей металу у ході тривалої експлуатації може бути наслідком протікання деформаційного старіння, механізм якого полягає у зменшенні рухливості дислокацій, що призводить до зниження пластичних властивостей металу і показників опору крихкому руйнуванню (ударної в'язкості та тріщиностійкості). Деградація механічних властивостей розглянутих сталей не обмежується змінами мікроструктури, викликаними процесами деформаційного старіння. Слід припускати і вклад, пов'язаний зі зміною в будові перліту, а також співвідношення структурних складових ферит/перліт.

Таким чином, мікроструктурні зміни («старіння») низьковуглецевих та низьколегованих сталей чинять істотний вплив на їх експлуатаційні властивості:

- призводять до зниження тріщиностійкості;
- призводять до зниження корозійної стійкості і сприяють розвитку корозійного розтріскування під напруженням;

старіння слабо впливає на границю плинності, але істотно міняє границю макропружності і, отже, змінює умови забезпечення тривалої міцності матеріалу.

Обмежене число досліджень щодо впливу мікроструктурного старіння на зміну механічних властивостей середньо- і високовуглецевих сталей (сталі 40Г, 45, 60Г, що використовуються для виготовлення деталей обладнання, які працюють в умовах високих циклічних навантажень – привідні та проміжні вали, гальмівні шківи бурових установок [4], тощо) привело до неправильного висновку про те, що вони не старіють, і що основною мікроструктурною

складовою, яка відповідає за старіння, може бути тільки пересичений ферит в низьковуглецевих сталях. Що стосується фериту, що входить в склад перліту, то він до старіння не схильний, і сталі з вмістом вуглецю вище 0,6% практично не чутливі до старіння. Тому довгий час вважали, що зі збільшенням вмісту вуглецю в сталі знижується схильність її до деформаційного старіння. Проте витримка, наприклад, середньовуглецевої сталі 45 при кімнатній температурі призводить до деякого зміцнення [12], яке відзначалося підвищенням міцності і зниження пластичності, а також підвищення границі плинності при незначному зростанні міцності і пластичних властивостей. Аналогічно зміні пружних властивостей змінюється і твердість, а також знижується ударна в'язкість. Таким чином, в сталях з середнім і високим вмістом вуглецю спостерігають ті ж прояви ефекту деформаційного старіння, що і в низьковуглецевих.

При дослідженні деформаційного старіння низьковуглецевої сталі Ст.3 було виявлено зміцнення перліту при одночасному зниженні міцності надлишкового фериту. Детальнішими дослідженнями [12] було показано, що зміна властивостей при деформаційному старінні середньо- і високовуглецевих сталей зумовлена значною мірою змінами, що відбуваються не в надлишковому фериті, а у фериті, що входить в склад перліту, тобто основної структурної складової, що відповідає за зміну властивостей при деформаційному старінні середньо- і високовуглецевих сталей. Таким чином, зміцнення перліту визначається субструктурою фериту, зменшенням міжпластинкової відстані, а також підвищенням щільності дислокацій в цементиті.

На основі вивчення особливостей процесів старіння сталей тривало експлуатованих металоконструкцій можна виділити основні параметри, що характеризуватимуть незворотні мікроструктурні зміни матеріалу. Детальний аналіз такого роду змін свідчить, що показниками деградації мікроструктури металу, які варто піддавати діагностуванню, є такі (рисунок 1.6):

– зміна розмірів і орієнтації зерен окремих мікроструктурних фаз з часом (різнозернистість), що призводять до анізотропії механічних і фізичних

властивостей у різних напрямках матеріалу як локально, так і по матеріалу загалом;

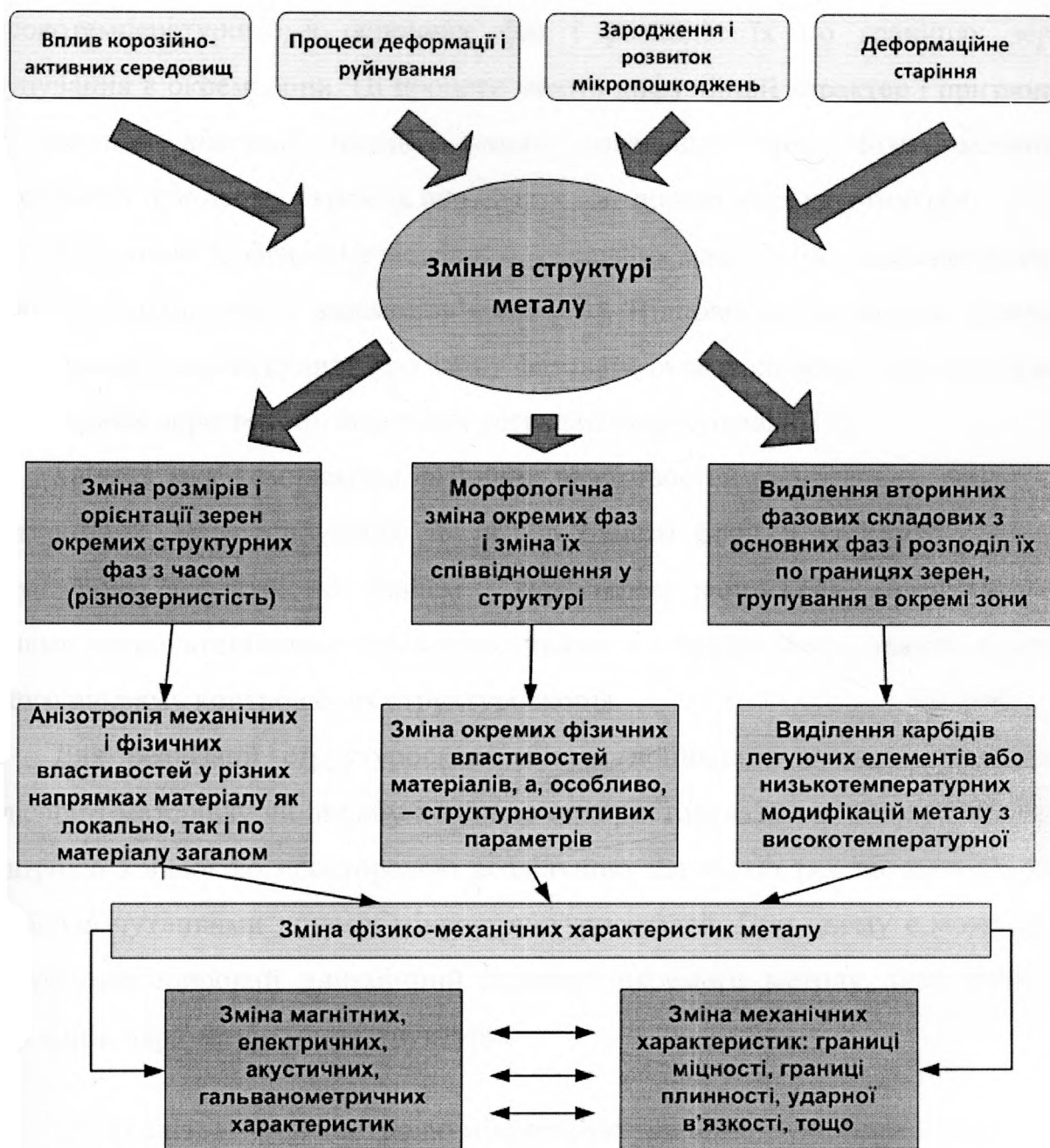


Рисунок 1.6 – Особливості мікроструктурних змін металевих матеріалів під дією експлуатаційних чинників

– морфологічна зміна окремих фаз і зміна їх співвідношення у мікроструктурі, що значно впливають на зміну окремих фізичних властивостей матеріалів, а, особливо, – структурночутливих параметрів (магнітних, електричних, акустичних тощо);

– виділення вторинних фазових складових (наприклад, карбідів легуючих елементів або низькотемпературних модифікацій металу з високотемпературної) з основних фаз і розподіл їх по границях зерен, групування в окремі зони. Ці процеси мають дифузійний характер і призводять до значної хімічної неоднорідності локальних зон. Фізико-механічні властивості при цьому окремих локальних зон значно відрізняться.

Механічні та фізичні властивості металевих матеріалів «закладаються» на рівні мікроструктури і взаємопов'язані [13]. Відповідно, за зміною фізичних властивостей можна судити про зміну фазового складу сплавів і про протікання структурних перетворень внаслідок деградації цих сплавів [14].

Зв'язок між комплексом фізичних властивостей (акустичних, магнітних, електричних, магнітопружних та ін.), з одного боку, і кристалографічною структурою, дефектністю, рівнем і характером напружень, механічними й іншими експлуатаційними характеристиками – з іншого боку, лежить в основі такого напряму контролю, як структуроскопія.

Для реалізації структуроскопії більш доцільним в плані збереження цілісності матеріалу чи виробу доцільно використовувати методи неруйнівного контролю з високою просторовою роздільною здатністю тих параметрів, які є найбільш чутливими до змін мікроструктури сталей. При цьому є можливість забезпечити широкий динамічний діапазон окремого методу, щоб виявляти малі зміни параметрів мікроструктури.

## 1.2 Аналіз методів контролю мікроструктури конструкційних сталей

Можливість застосування фізичних методів для оцінювання мікроструктурного стану заснована на тому, що між зміною структурного стану металевих сплавів і зміною фізичних властивостей існує певний зв'язок. За зміною фізичних властивостей можна судити про зміну фазового складу сплавів і про протікання структурних перетворень. Методи вимірювання фізичних властивостей для оцінювання фазового складу сплавів, на відміну від класичних металографічних методів, відрізняються рядом переваг. Передусім

фізичні властивості можна вимірювати і реєструвати безперервно і автоматично, у тому числі і при швидкозмінних зовнішніх чинниках: швидкому нагріві або охолодженні, дії зовнішнього середовища і т. п., тобто в умовах, коли металографічні методи не можуть бути застосовані. Зміна цих властивостей може характеризувати кінетику зміни фазового складу сплавів.

Крім того, за зміною фізичних властивостей можна фіксувати фазові перетворення II роду (концентраційне розшарування, ближнє впорядкування, магнітне перетворення, перехід у надпровідний стан), оскільки ці властивості змінюються при перерозподілі атомів і при зміні взаємодії електронів усередині фаз, які не можна помітити при використанні структурних методів. З фізичних методів, що найчастіше використовуються для виявлення фазового складу сплавів і кінетики його зміни, найширше використовують методи визначення електричних і магнітних властивостей (рисунок 1.7).

Розглянемо основні методи контролю, що найчастіше використовуються для контролю стану мікроструктури станом на сьогодні.

### 1.2.1 Акустичні методи структуроскопії сталей

Акустичний контроль мікроструктурних властивостей матеріалів ґрунтований на встановленні зв'язку властивостей (величина зерна, текстура і т. п.) з акустичними характеристиками матеріалів (швидкість поширення і коефіцієнт загасання пружних хвиль, характеристичний імпеданс і т. п.). Розсіяння ультразвукових коливань (далі – УЗК) в металах залежить від розміру зерна. Відомо, що на розсіяння і поглинання УЗК впливають також теплові характеристики, гістерезис і структурна неоднорідність.

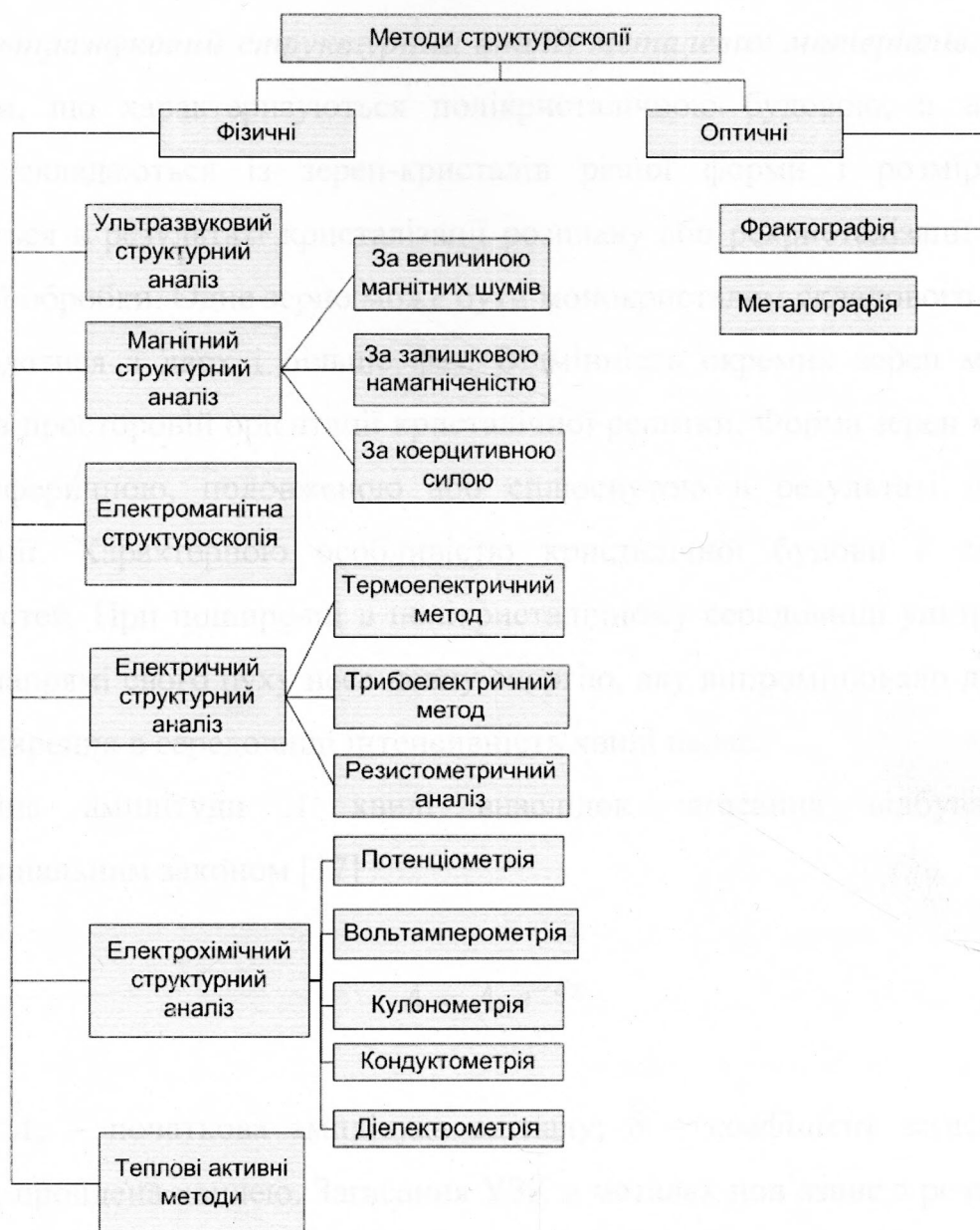


Рисунок 1.7 – Класифікація методів контролю параметрів мікроструктури конструкційних матеріалів

Ультразвуковий структурний аналіз, акустичні методи контролю твердості, щільності, жорсткості і інших характеристик матеріалів і виробів останніми роками одержали широке поширення в різних областях техніки. [16] Ультразвукові методи оцінювання властивостей матеріалів і виробів, основані на вимірюванні швидкості, загасання ультразвуку, представляють великий науковий і практичний інтерес зважаючи на можливість значного скорочення часу контролю.

**Ультразвуковий структурний аналіз металевих матеріалів.** Металеві матеріали, що характеризуються полікристалічною будовою, в загальному випадку складаються із зерен-кристалів різної форми і розмірів. Зерна формуються в результаті кристалізації розплаву або рекристалізації в процесі термічної обробки. Одне зерно може бути монокристалом складового матеріалу або складатися з двох і більше фаз. Відмінність окремих зерен між собою полягає в просторовій орієнтації кристалічної решітки. Форма зерен може бути майже сферичною, подовженою або сплюснутою в результаті пластичної деформації. Характерною особливістю кристалічної будови є анізотропія властивостей. При поширенні в полікристалічному середовищі ультразвукової хвилі у напрямі свого руху несе певну енергію, яку випромінювало джерело. У міру поширення в середовищі інтенсивність хвилі падає.

Зміна амплітуди  $A$  хвилі внаслідок загасання відбувається за експоненціальним законом [17]

$$A = A_0 e^{-\delta x}, \quad (1.1)$$

де  $A_0$  – початкова амплітуда сигналу;  $\delta$  – коефіцієнт загасання;  $x$  – відстань, пройдена хвилею. Загасання УЗК в металах пов'язане з розсіюванням ультразвуку через неоднорідності структури і його поглинанням. Тому коефіцієнт загасання складається з коефіцієнтів поглинання  $\delta_n$  і розсіяння  $\delta_r$ , тобто  $\delta = \delta_n + \delta_r$ . В однорідному ізотропному пружному середовищі і в монокристалах металів загасання визначається поглинанням ультразвуку. При цьому енергія пружних коливань переходить в теплову.

У полікристалічному середовищі і в металах, що мають пружну анізотропію, загасання визначається розсіюванням енергії коливань зернами металу. У окремих кристалах швидкість ультразвуку має різне значення залежно від напрямку його поширення відносно осей симетрії. Тому під час переходу ультразвуку з одного кристала в іншій і різній їх орієнтації швидкість ультразвуку може істотно змінюватися. В результаті цього виникають часткове

віддзеркалення, заломлення ультразвуку і трансформація типів хвиль. УЗК поступово розсіюються на всі боки, причому міра розсіяння визначається головним чином відношенням довжини пружної хвилі  $\lambda$  до середнього діаметру зерен-кристалів  $\bar{d}$ , а також мірою анізотропії металу.

У діапазоні частот, для яких  $\lambda/\bar{d} \geq 10$ , коефіцієнт розсіювання ультразвуку для чистих металів  $\delta_p \approx \bar{d}^3 f^4$ , тобто розсіяння носить релеївський характер. Розсіяння ультразвуку в металі при  $\lambda/\bar{d} < 10$  перестає бути релеївським:  $\delta'_p \approx \bar{d} f^2$ . Особливо велике загасання при  $\lambda/\bar{d} \approx 3$ . В цьому випадку до розсіяння УЗК додається поглинання, пов'язане з релаксацією теплопровідності на анізотропних кристалах.

Граденти температур, що виникають на границях окремих кристалів в процесі їх деформації, не встигають вирівнюватися за період коливань, що призводить до зростання теплових втрат. При  $\lambda \leq \bar{d}$  звук поглинається в кожному зерні, як в одному великому кристалі, і загасання визначається, в основному, поглинанням. У гетерогенних полікристалічних матеріалах, наприклад чавуні, сталі, загасання УЗК використовується для дослідження структурних чинників полікристалічних металів [19 – 21].

Для кількісної оцінки особливостей мікроструктури металів у випробовуваний зразок вводять УЗК і спостерігають зміни амплітуди цього сигналу при багатократному віддзеркаленні. Міру неоднорідності мікроструктури оцінюють за загасанням УЗК, при цьому коефіцієнт загасання [20]

$$\delta = (\ln A_n / A_{n+1}) / 2l \quad (1.2)$$

де  $l$  – довжина зразка;  $A_n, A_{n+1}$  – амплітуди послідовно відбитих донних сигналів.

У крупнозернистому металі ультразвукові коливання затухнуть швидше, ніж в дрібнозернистому. Для зміни амплітуд сигналів в ультразвуковому

приладі застосовується калібрувальний подільник напруги (атенюатор), який дозволяє визначати відношення амплітуд сигналів для обчислення коефіцієнта загасання.

Оцінку мікроструктури і пружних характеристик крупнозернистих і композиційних матеріалів здійснюють за швидкістю поширення поздовжніх хвиль в різних напрямках. Крім того, будують годографи швидкостей для головних напрямів.

### 1.2.2 Магнітні методи структуроскопії сталей

Зв'язки між магнітними властивостями матеріалу і його хімічним складом, кристалографічною і фазовою складовими мікроструктури дозволяють використовувати магнітні властивості матеріалу як індикатор його структурного стану. Контроль структурного стану матеріалу магнітними методами заснований на визначенні таких структурночутливих магнітних характеристик об'єкту контролю, як коерцитивна сила, магнітна проникність, залишкова індукція. Магнітні методи застосовують для контролю структурно-механічних властивостей матеріалів в тих випадках, коли існує однозначна залежність між вимірюваною магнітною характеристикою і контрольованим параметром. Для багатьох марок конструкційних середньовуглецевих сталей залежність структурно-чутливих магнітних характеристик від контрольованого параметра (температури відпускання, твердості та ін.) носить неоднозначний характер. При визначенні впливу на результати вимірів на магнітні характеристики впливають такі фактори, як зміна геометричних розмірів об'єкту контролю, швидкість його переміщення. Вони обмежують застосування магнітних методів для контролю структурно-механічних властивостей металевих матеріалів. Застосування магнітних методів пов'язане з вивченням магнітних властивостей матеріалів, зокрема розмагнічуючого чинника, магнітного опору і заломлення магнітних силових ліній [15, 22].

При виборі методу контролю завжди доцільно виходити з таких класичних магнітних характеристик матеріалу, як магнітна проникність, що залежить від напруженості поля, коерцитивна сила  $H_c$ , залишкова індукція  $B_0$  і індукція насичення  $B_s$ . Слід також враховувати залежність цих характеристик від величини деформаційного зміцнення, внутрішніх напружень, хімічного і фазового складів.

З магнітних методів для контролю структури і властивостей матеріалів найбільш широке застосування знайшли методи коерцитивної сили, намагніченості, залишкової індукції, магнітної проникності, ефекту Баркгаузена [23].

**Метод коерцитивної сили.** За коерцитивною силою визначають [24] величину зерна мікроструктури сталевих виробів. Методом коерцитивної сили можна здійснювати контроль твердості і товщини загартованого шару термооброблених поверхонь виробів. При цьому використовують приставні електромагніти коерцитиметра з визначеними геометричною формою і площею полюсних наконечників і задають необхідну глибину проникнення магнітного потоку у виріб.

При контролі товщини загартованого шару стикаються з різною початковою структурою виробу перед гартуванням, що суттєво впливає на результати контролю. У зв'язку з цим необхідно проводити вимірювання магнітних властивостей виробу перед гартуванням, а потім оцінювати вплив початкової структури виробів на магнітні параметри контролю графічно або аналітично.

Контроль твердості загартованого шару без урахування його глибини можна здійснити лише при незначному проникненні магнітного потоку у виріб, використовуючи або невеликі розміри полюсів електромагніту і малу відстань між ними, або метод вимірювання втрат енергії на перемагнічування в загартованому шарі поверхнево термооброблених виробів, де глибина проникнення електромагнітного поля може бути задана частотою.

У першому випадку визначають струм розмагнічування, пропорційний до магнітних властивостей початкової структури виробу перед гартуванням (виміри проводять на незагартованій ділянці). Потім за допомогою цього ж магніту вимірюють струм розмагнічування, пропорційний до магнітних властивостей загартованого шару з урахуванням його товщини. За наявності трьох вимірних параметрів можна оцінити твердість поверхні термооброблених деталей.

У другому випадку вимірюють дві характеристики – магнітні властивості виробу перед і після гартування. Якщо глибина проникнення електромагнітного поля відповідає товщині загартованого шару, то результати порівняння дають інформацію про твердість загартованого шару.

Контроль пористості і мікроструктури виробів з феромагнітних матеріалів, виготовлених методами порошкової металургії (металокерамічні вироби), здійснюється диференціальними магнітними структуроскопами, що дозволяють виключити металографічний і гідростатичний способи контролю мікроструктури, пористості і забезпечити високопродуктивний 100%-ний неруйнівний контроль.

**Метод намагніченості** заснований на вимірюванні напруженості магнітного поля. Для визначення напруженості магнітних полів використовують вимірювальний зонд (індукційну котушку). У індукційній котушці, що пронизується магнітним потоком  $\Phi$ , індукується напруга [25]

$$U_{ind} = -n\mu_0\mu_n S(dH / dt), \quad (1.3)$$

де  $n$  – число витків котушки.

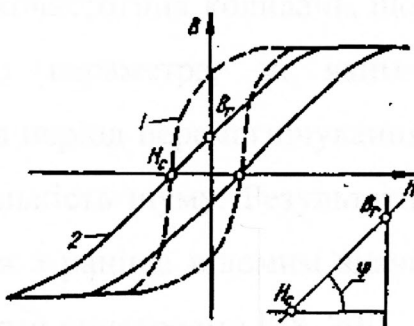
За допомогою індукційної котушки вимірюють завищені магнітні поля. При контролі в постійному полі для вимірюванні потоку досліджуваний зразок або індукційна котушка повинні приводитися в рух. Це досягається шляхом поступального руху, коливання або обертання котушок.

Головною умовою при усіх видах вимірів є підтримання постійної швидкості руху незмінного потоку  $D\Phi/dt$ .

**Метод залишкової індукції.** Незмінність величини коерцитивної сили, на відміну від інших магнітних характеристик матеріалу при вимірюванні розмагнічуючого чинника, лежить в основі методу залишкової індукції. У разі коротких товстих деталей уявна проникність матеріалу внаслідок великого розмагнічуючого чинника залежить, головним чином, від форми і визначається із співвідношення [26]

$$\mu_1 \approx 1/(1/\mu_r + N/4\pi). \quad (1.4)$$

Тому при однаковому відношенні довжини до товщини виробу відмінність в матеріалі призводить тільки до паралельного зрушення граничних кривих (рисунок 1.8).



1 – істинна; 2 – усічена

Рисунок 1.8 – Зсув петлі гістерезису при намагнічуванні і розмагнічуванні ферромагнітних матеріалів

Це означає, що  $\mu_s = \operatorname{tg}\varphi = B_r/H_c$ . Звідси випливає, що вимірювання коерцитивної сили  $H_c$  можна замінити вимірюванням залишкової індукції  $B_r$ . З іншого боку, за допомогою залишкової індукції можна знайти пропорційне їй залишкове поле. Отже, за змінами останнього можна судити про зміни коерцитивної сили. Тому метод визначення залишкової індукції дозволяє здійснити повноцінну заміну виміру  $H_c$  на  $B_r$ .

В цьому випадку досягається управління роздільним сортуванням виробів за мікроструктурою за допомогою електронної обробки результатів. Так як на зміну напруженості магнітного поля навколо точкового полюса впливають явища, пов'язані з анізотропією, подібні магнітні прилади можна використовувати для контролю, наприклад, текстури.

**Метод ефекту Баркгаузена.** Останнім часом набув поширення метод, який ще називають методом магнітних шумів [27]. Виявилася залежність шумів від мікроструктури, хімічного складу, режимів термообробки, наявності дефектів, магнітоактивних включень, шорсткості поверхні феромагнетика, його геометричних розмірів, електропровідності. У основі методу лежить розподіл імпульсів електрорушійної сили (далі – ЕРС) за амплітудами, тривалістю, спектральному складі заповнення імпульсів. Хороші результати дають пристрої, що реалізують спектральні характеристики стрибків Баркгаузена. Для перемагнічування контрольованого виробу використовується промислова мережа або генератор низькочастотних коливань, що входить в схему приладу. У якості інформативного параметра, за яким здійснюється контроль, використовують середню за період перемагнічування потужність шуму в смузі частот або спектральну щільність шуму. Результати вимірювання зчитуються оператором і порівнюються з раніше відомим значенням, або поступають на блок автоматики з пороговими пристроями [28, 29].

### 1.2.3 Електромагнітний контроль мікроструктури

Визначення структурно-чутливих електричних і магнітних характеристик матеріалів або виробів за допомогою змінного поля складає суть вихреструмового контролю структури і властивостей матеріалів. Можливість такого контролю пов'язана з особливостями поведінки металів в змінних полях, передусім із зменшенням амплітуди змінного поля і зміною його фази при проникненні в провідний матеріал з неоднозначною залежністю магнітної проникності від напруженості поля.

Для феромагнітних матеріалів і виробів величина вихрових струмів залежить від трьох параметрів: електропровідності  $\sigma$ , розмірів виробу та магнітної проникності  $\mu$ . В той же час, магнітна проникність є також функцією напруженості намагнічуючого поля [30].

У області слабких полів ( $H \ll H_c$ ), згідно Релею, магнітна проникність лінійно зростає із збільшенням поля, тобто  $\mu = \mu_a + Nn$ ,  $\mu_d = \mu_a + 2Nn$  де  $\mu_a$  – початкова проникність;  $\mu_d$  – диференціальна проникність;  $\mu_d = Db/Dh$  – величина, що характеризує швидкість зростання магнітного моменту із збільшенням поля;  $\nu$  – коефіцієнт Релея. У слабких полях  $\mu_d > \mu$ , в сильних –  $\mu_d < \mu$ ; при  $H \rightarrow \infty$   $\mu$  і  $\mu_d \rightarrow 1$ .

У області сильних полів ( $H > H_{max}$ ), згідно Фрейліху, з полем лінійно пов'язана зворотна величина магнітної проникності, тобто  $1/\mu = a + Bh$ , де  $a/b$  – магнітна жорсткість  $H_o$ , що має розмірність напруженості поля;  $1/b$  – індукція насичення:  $B_s = 4\pi j_s$  – розмірність магнітної індукції. При  $H \rightarrow \infty$  індукція  $B \rightarrow 1/b$ .

Амплітудно-фазовий метод заснований на вимірюванні амплітуди і фази вторинної ЕРС. При контролі феромагнітних матеріалів ставляться підвищені вимоги до постійності розмірів виробу і рекомендується робота при низьких частотах поля, коли впливом вихрових струмів можна знехтувати і вважати, що магнітний потік розподілений по перерізу об'єкта контролю рівномірно. При цьому ефективна глибина проникнення вихрових струмів велика і ослаблення поля вихровими струмами буде досить невеликим. Це досягається при частоті поля  $f$  меншій за характеристичну частоту  $f_x = 0,6366/\sigma\mu D^2$ , де  $\sigma$  – електропровідність;  $D$  – діаметр обмотки котушки перетворювача.

У вторинній  $E_{1p}$  і  $E_1$ , що виникає при намагнічуванні феромагнітного матеріалу синусоїдальним полем, з'являються вищі гармонійні складові. Використання їх дозволяє отримати додаткову інформацію.

Встановлено, що за амплітудою третьої гармоніки вторинної ЕРС, що виникає при намагнічуванні виробів з великим розмагнічуючим вектором  $H$

слабким змінним полем, можна судити про коерцитивну силу матеріалу, а значить – про його структуру [31].

Взаємозв'язок між намагнічуючим полем  $H = f(t)$ , магнітними властивостями речовини, що характеризуються петлею гістерезису  $B = f(H)$ , усередненим (по перерізу) потоком індукції  $B = f(t)$  і ЕРС, наведеною у вимірювальній котушці перетворювача  $e = f(t)$ , може бути представлена у вигляді ряду синусоїдальних коливань (ряду Фур'є) [32]

$$E(t) = E_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + E_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + E_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots, \quad (1.5)$$

де коефіцієнти  $E_1, E_2, E_3$  – амплітуди гармонік;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – їх фази. Специфічна особливість вищих гармонік полягає в тому, що як інформативні складові сигналу перетворювача (параметрів сигналу, за якими оцінюється структурний стану об'єкта контролю) використовуються вищі гармонійні складові, починаючи з другої гармоніки.

У методі вищих гармонік (далі – МВГ) досить чітко сформувався три основні напрями, що відрізняються режимами збудження магнітного поля: синусоїдальним струмом, двочастотними синусоїдальними струмами різних частот, і комбінований – постійним і синусоїдальними струмами.

При одночастотному збудженні магнітного поля синусоїдальним струмом як інформативні складові використовуються непарні гармоніки сигналу. Із збільшенням номера аналізованої гармонійної складової зменшується її амплітуда. Це створює значні технічні труднощі при виділенні гармоніки для наступного аналізу. Тому контроль при синусоїдальному збудженні проводиться зазвичай з використанням третьої, рідше п'ятої і сьомої, гармонік.

У простому варіанті аналізується амплітуда однієї з гармонік, найбільш чутлива до контрольованого параметру, проте в цьому випадку не досягається виключення пустотних. Одночасне використання декількох гармонійних складових сигналу істотно ускладнює апаратуру і методику налаштування.

Тому в МВГ зазвичай аналізується амплітуда і фаза виділеної гармонійної складової (амплітудно-фазовий спосіб відстроювання) [33].

Можливість ефективного використання МВГ визначається не лише якістю апаратури для реалізації методу. На результати контролю впливає також вибір режиму живлення перетворювача. Аналіз режимів роботи перетворювачів при вихреструмовому контролі здійснюють за залежністю гармонійних складових ЕРС від магнітних і електричних властивостей матеріалу. Для отримання цих залежностей проводять розрахунок електромагнітного поля усередині феромагнетика з урахуванням вихрових струмів і нелінійних магнітних характеристик [34].

Структурна схема приладів для МВГ складається з трьох частин: намагнічуюча, вибіркова і вимірювальна системи.

Вихреструмові прилади застосовують для оцінювання ступеню хімічної чистоти електропровідних матеріалів, сортування напівфабрикатів і виробів за марками (хімічним складом), за твердістю, міцністю, тощо.

#### 1.2.4 Електричні методи структуроскопії сталей

**Термоелектричний контроль** марки матеріалів знайшов широке застосування завдяки простоті конструкції і експлуатації термоелектричних приладів, наприклад, типу ТСП-16, ФЛТ – I [36].

Методологічно при реєстрації результатів контролю на індикаторному приладі при термоелектричному розподілі металів за марками можна виділити три способи [35]:

різні комбінації елементів сплаву або чисті метали створюють термо-ЕРС різних знаків;

- контакт електроду з виробами різних марок дозволяє одержати значення термо-ЕРС з достатнім розкидом;

- термо-ЕРС, що виникає при контакті гарячого електроду з контрольованими об'єктами, виготовленими з того ж матеріалу, що і гарячий електрод, постійна, а усі інші – викличуть її зміну.

Працюють термоелектричні прилади таким чином (рисунок 1.9).

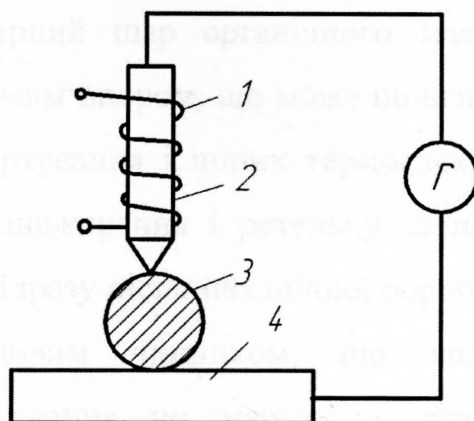


Рисунок 1.9 – Схема пояснення принципу роботи термоелектричних засобів контролю

Контрольований зразок 3 поміщається на площадку 4 з електропровідного матеріалу, що, як правило, виготовляється з міді або латуні. До контрольованої поверхні торкаються гарячим електродом (70 – 90 °С) 2, що підігрівається елементом 1. Останній живиться від силового знижувального трансформатора. У місці контакту гарячого електроду з деталлю 3 виникає термо-ЕРС, і струм починає протікати по колу, в яке включений індикаторний прилад *r*. Струмами, що виникають через контактну різницю потенціалів в місці контакту контрольованого об'єкту з площадкою 4 і місцях з'єднання елементів схеми, можна знехтувати через порівняно мале їх значення по відношенню до термо-ЕРС. При конструюванні такого типу приладів велике значення має забезпечення умов, що виключають підвищення температури площадки 4 вище за температуру контрольованого об'єкту 3. Гарячий електрод виготовляється з теплопровідного матеріалу, що не окислюється при температурах 60 – 100 °С.

На значення термо-ЕРС матеріалу при визначенні його належності до тієї або іншої марки значний вплив чинять такі чинники, як тиск і температурна стабільність гарячого електроду або різниця температур цього електроду і

контрольованого об'єкту, стан їх поверхонь, хімічний склад і т. д. Вплив на загальну термо-ЕРС, що виникає в місці контакту, робить як термо-ЕРС утвореної плівки, так і опір її протіканню струму.

На стабільність вимірів термо-ЕРС в реальних виробничих умовах робить вплив тонкий молекулярний шар органічного мастила на контрольованій поверхні з високим питомим опором, що може понизити значення ЕРС на 30 – 70%. Тому методики сортування і інших термоелектричних випробувань, як правило, передбачають знежирення і ретельну зачистку місця контакту або проведення сортування відразу після механічної обробки [37].

Ще одним важливим чинником, що впливає на ефективність термоелектричного сортування по марках, є структурний стан об'єктів контролю. Найбільш стабільні результати виходять при сортуванні виробів, які пройшли відпал, що забезпечує відсутність внутрішніх напружень, або нормалізацію. Проте досвід показав, що нетермооброблені вироби також можуть бути розсортовані за марками, але для кожного конкретного випадку має бути розроблена спеціальна методика і встановлені свої критерії відбракування. Марка сплаву може визначатися навіть під шаром гальванічного покриття. В цьому випадку окрім термо-ЕРС, що виникає при зіткненні гарячого електроду з матеріалом покриття, в результуючу буде входити ЕРС, що виникає між покриттям і підкладкою. Підібравши матеріал гарячого електроду так, щоб ЕРС для контакту з покриттям була мінімальною, і знаючи значення термо-ЕРС для матеріалу покриття у контакті з рядом сплавів, можна судити про марку матеріалу підкладки.

Термоелектричний контроль застосовують для контролю структурного стану металів і якості хіміко-термічної обробки. Існує цілком задовільна кореляція між структурним станом (фазовий склад, величина зерна, твердість), напруженнями в металі і термо-ЕРС. Термоелектричним методом можуть виявлятися зони підвищення вмісту вуглецю, міді, кремнієвих ліквіцій залежно від складу сплаву і умов кристалізації [38].

Значення термо-ЕРС і твердості знаходяться в прямій залежності від вмісту вуглецю в твердому розчині. При вмісті вуглецю в цементованому шарі нижче евтектоїдного спостерігається однозначна залежність від нього значень термо-ЕРС, а при рівному або більшому змісті – така залежність відсутня [39].

**Трибоелектричний метод** використовується для визначення марки матеріалу труб, прутків або бухт дроту. Для контролю застосовують прилади з обертовим або еталоном, що здійснює зворотно-поступальний рух [40].

**Методи вимірювання електричних властивостей (резистометричний аналіз).** До електричних властивостей, що найширше використовуються для дослідження металевих матеріалів, в першу чергу відносяться питома електропровідність ( $\gamma$ ) і зворотна їй величина – питомий електричний опір ( $\rho$ ). Електропровідність металів обумовлена рухом вільних електронів, що змінюють свій стан під впливом електричного поля, що і призводить до виникнення результуючого струму. При своєму русі потік електронів зазнає опір, що викликається флуктуаціями теплових коливань атомів в ґратках і їх недосконалістю [41].

Істотний вклад у величину питомого електроопору сплавів вносять також міжфазні межі і області концентраційної неоднорідності. Методи вимірювання електричних властивостей характеризуються високою точністю і чутливістю [42], що дозволяє їх широко використовувати при вивченні концентраційних змін в твердих розчинах, кінетики фазових і структурних перетворень, зміни щільності дефектів будови і багатьох інших явищ в металах і сплаві. Загальні закономірності зміни електричних властивостей, залежно від структурного стану і хімічного складу сплавів, встановлені М.С. Курнаковим у вигляді діаграм «склад – властивість» [43, 44].

Встановлено, що при збільшенні концентрації легуючого елемента питомий електроопір в безперервних твердих розчинах заміщення змінюється в загальному випадку за параболічним законом, в твердих розчинах впровадження – за лінійним законом, у разі гетерогенних структур наслідують лінійний закон, а його величина підкоряється правилу адитивності електроопору

граничних фаз (якщо відношення між ними знаходиться в межах 0,75 – 1,25) відповідно до їх концентрації по масі. У разі утворення хімічних сполук в концентраційній області їх існування з'являється особлива, або названа М.С. Курнаковим сингулярною, точка. Якщо ж такої точки не виявляється, то такі фази, що виникають в цих сплавах, розглядаються як проміжні.

#### 1.2.5 Електрохімічні методи контролю мікроструктури

Існуючі на сьогодні аналітичні методи визначення складу сплаву мають істотні недоліки, пов'язані з руйнуванням зразка, або з високою вартістю використовуваних рентгенодифракційних апаратних засобів.

Принципово нові можливості для аналітичної діагностики сплавів відкриваються при реєстрації електрохімічних параметрів системи «досліджуваний метал – електроліт» в умовах дії на межу розділу двох середовищ високоенергетичними потоками. У зоні сильнострумової дії протікають складні багатофакторні процеси, виникають мікроплазмові розряди, що ініціюють різні хімічні реакції, протікають електрохімічні реакції. Така дія, здійснювана в умовах повторюваності, дозволяє отримати вольт-амперні залежності, форма яких залежить виключно від властивостей досліджуваного матеріалу і є параметром вимірювальної системи, що відображає компонентний склад і структуру сплаву [45].

Електрохімічний метод аналізу має ряд конкурентних переваг. Слід зазначити доступність з точки зору вартості устаткування і надзвичайно високу продуктивність, що дає можливість використовувати його в металургії, металообробці і машинобудуванні

Електрохімічні методи аналізу – сукупність методів якісного і кількісного аналізу, заснованих на електрохімічних явищах, що відбуваються в досліджуваному середовищі або на межі розділу фаз і пов'язаних із зміною структури, хімічного складу або концентрації аналізованого сплаву. Електрохімічні методи аналізу діляться на п'ять основних груп [46]:

потенціометрію, вольтамперометрію, кулонометрію, кондуктометрію і діелектрометрію. *Потенціометрія* об'єднує методи, засновані на вимірюванні ЕРС оборотних електрохімічних ланцюгів, коли потенціал робочого електроду близький до рівноважного значення. Потенціометрія включає редоксметрію, іонометрію і титрування потенціометра. *Вольтамперометрія* заснована на дослідженні залежності струму поляризації від напруги, що прикладається до електрохімічної комірки, коли потенціал робочого електроду значно відрізняється від рівноважного значення. За різноманітністю методів вольтамперометрія – найчисленніша група з усіх електрохімічних методів аналізу, широко використовується для визначення речовин в розчинах і сплавах. *Кулонометрія* об'єднує методи аналізу, засновані на вимірюванні кількості речовини, що виділяється на електроді в процесі електрохімічної реакції відповідно до законів Фарадея. При кулонометрії потенціал робочого електроду відрізняється від рівноважного значення. Розрізняють потенціостатичну і гальваностатичну кулонометрію, причому остання включає прямий і інверсійний методи, електроаналіз і кулонометричне титрування. До *кондуктометрії* відносяться методи, в яких вимірюють електропровідність електролітів (водних і неводних розчинів, колоїдних систем, розплавів, твердих речовин). Кондуктометричний аналіз заснований на зміні концентрації речовини або хімічного складу середовища в міжелектродному просторі; він не пов'язаний з потенціалом електроду, який зазвичай близький до рівноважного значення. *Діелектрометрія* об'єднує методи аналізу, засновані на вимірюванні діелектричної проникності речовини, обумовленою орієнтацією в електричному полі часток (молекул, іонів), що мають дипольний момент.

#### 1.2.6 Тепловий метод контролю дефектів мікроструктури

Тепловий метод неруйнівного контролю заснований на реєстрації збурень, що вносяться внутрішніми дефектами в регулярний (еталонний) характер поширення теплових потоків в об'єкті контролю. На практиці аналізують двовимірний нестационарний розподіл температури на поверхні

об'єкту контролю, причому інформативними ознаками прихованих дефектів є локальні температурні сигнали або характерні часи теплопередачі [18].

У теплових методах неруйнівного контролю використовується теплова енергія, що поширюється в об'єкті контролю. Температурне поле поверхні об'єкту є джерелом інформації про особливості процесу теплопередачі, які, у свою чергу, залежать від наявності внутрішніх або зовнішніх дефектів, різних відхилень фізичних властивостей об'єкту контролю від норми, наявності місць локального перегрівання (охолодження) і т. п.

Розрізняють пасивний і активний тепловий контроль. При пасивному тепловому контролі аналіз теплових полів виробів здійснюють реєстрацією їх власного теплового випромінювання. Активний тепловий контроль припускає нагрів об'єкту зовнішнім джерелом енергії.

Основною характеристикою температурного поля, що є індикатором дефектності, є величина локального температурного перепаду. Координати місця перепаду, його рельєф або, іншими словами, топологія температурного поля і його величина в градусах є функцією великої кількості чинників. Ці чинники можна підрозділити на внутрішні і зовнішні. Внутрішні чинники визначаються теплофізичними властивостями контрольованого об'єкту, а також його геометричними параметрами. Зовнішніми чинниками є характеристики процесу теплообміну на поверхні об'єкту контролю (найчастіше величина коефіцієнта конвективної тепловіддачі), потужність джерела нагріву і швидкість його переміщення уздовж об'єкту контролю.

Основним інформаційним параметром при тепловому контролі є локальна різниця температур між дефектною і бездефектною областями об'єкту. При нагріванні виробів, що містять дефекти мікроструктури, що погано проводять тепло (типу неметалевих включень, потовщення границь зерен), перепад позитивний для поверхні, що піддається нагріву (тобто місце дефекту характеризується локальним підвищенням температури), і негативний для протилежного випадку. У разі дефекту, що проводить тепло краще за

основний метал виробу (металеві включення), знак перепаду змінюється на зворотний.

Існують такі способи активного теплового контролю виробів [47] :

1. Короткочасний локальний нагрів виробу з наступною реєстрацією температури у тій же (при односторонньому контролі) або протилежній області (при двосторонньому контролі). Після закінчення деякого часу (щоб виріб встиг вистигнути) переходять до наступної точки і т. д., причому виміряна температура дефектних областей істотно відрізнятиметься від температури бездефектних ділянок.

2. З використанням скануючої системи, що складається з жорстко закріплених одне відносно одного джерела нагріву і реєструючого приладу (наприклад, радіометра), що переміщуються з постійною швидкістю уздовж поверхні зразка.

3. Одночасний нагрів поверхні зразка уздовж деякої лінії з наступною реєстрацією температури уздовж тієї ж лінії (при одночасному контролі) або уздовж аналогічної лінії з протилежної поверхні зразка (при двосторонньому контролі).

4. Одночасний нагрів усієї поверхні зразка і наступна одночасна реєстрація температурного розподілу на цій же або на протилежній поверхні. Подібний спосіб контролю може бути здійснений за допомогою тепловізора.

Ефективність виявлення порушень мікроструктури кожним з описаних способів теплового контролю зменшується від першого до четвертого, а продуктивність – зростає.

Отже, у сучасному розвитку методів аналізу стану мікроструктури виділяють два основні напрямки [48]:

- 1) пошук нових параметрів контролю та розробка відповідних методик вимірювання та вимірювальних перетворювачів;
- 2) багатопараметровий контроль з використанням одночасно двох чи більше інформативних параметрів.

Можливості першого напрямку здебільшого вже реалізовані, а розвиток багатопараметрової структуроскопії стимулюється не тільки ускладненням задач контролю, але і бурхливим розвитком комп'ютерних технологій збору та обробки вимірювальної інформації.

### 1.2.7 Металографічні та фрактографічні методи

Основним методом вивчення структури є металографія [44]. Мікроструктуру металу вивчають при збільшенні в 30...1500 разів за допомогою оптичних мікроскопів на спеціально підготовлених зразках-шліфах (полірованих і протравлених). Метод заснований на відмінності в протравлюванні бездефектного металу і ділянок з наявністю пор, лікваций, неоднорідності структури і інших дефектів. Будову металу при збільшенні в 3000...100 000 разів вивчають за допомогою електронних мікроскопів [16, 49].

При проведенні технічної діагностики діючого обладнання металографічні дослідження можуть виконуватися в польових умовах. Шліфи при цьому роблять без вирізування зразків безпосередньо з досліджуваної поверхні, а будову металу вивчають за допомогою переносних металографічних мікроскопів [49].

Дослідження мікроструктури дозволяє встановити фазовий склад, величину зерна і міру зростання величини міжзернових границь, наявність і розміри неметалічних включень, міру сфероїдизації перліту, характер і глибину термічної обробки, наявність міжкристалітної корозії, наявність ушкоджень типу водневої корозії.

Застосування сучасних цифрових технологій дозволяє суттєво знизити трудомісткість металографічних досліджень і підвищити об'єктивність кількісних оцінок. Реєстрація зображення мікроструктури в металографічних мікроскопах при цьому здійснюється за допомогою цифрових фото- або відеокамер. Далі зображення вводиться в комп'ютер, де обробляється за допомогою спеціальної програми-аналізатора.

У ряді випадків для дослідження структури сталі доцільно застосовувати методи фрактографії (від англ. *fracture* – руйнування) [16], яка вивчає будову зламів. Злами бувають двох видів: крихкі і в'язкі. Крихкий злам відбувається миттєво, в'язкий зазвичай починається із зародження і розвитку мікротріщини і відбувається протягом тривалого часу. Вивчення будови зламів (фрактографія) проводиться візуально при невеликому збільшенні. Використовують також методи скануючої (на поверхнях масивних зразків) і електронної мікроскопії [16].

Фрактографічні дослідження дозволяють зрозуміти механізм руйнування. Роль фрактографії особливо зростає в тих випадках, коли в процесі виготовлення або експлуатації знижується когезивна міцність границь зерен, що проявляється в зміні будови зламу. Крихкий злам з транскристалітного, тобто по тілу зерна, стає міжзерновим (по їх границях) і набуває характерної огранки. В'язкий злам в межах макровідстаней поширюється лінійно і незалежно від границь зерен, а переріз металу в зоні зламу має обважнений вид.

Металографічні і фрактографічні дослідження дозволяють встановити природу окрихчування і зміни інших властивостей металу, оцінити безпеку подальшої експлуатації обладнання і вказати шляхи усунення несприятливого впливу експлуатаційних чинників.

Однак суттєвим недоліком наведених методів є необхідність у одержанні зразків для досліджень механічними методами, чи зразки є вже результатом руйнування, що призводить до порушення суцільності матеріалу і в експлуатаційних умовах є неприпустимим.

### 1.3 Вибір та обґрунтування напрямку подальших досліджень

Аналіз процесів деградації основного металу елементів нафтогазового обладнання, що працює в складних умовах експлуатації, та її наслідків показав, що конструкції, які експлуатуються понаднормовий термін, вимагають особливої уваги для забезпечення їх надійності та довговічності. Для цього

необхідна діагностика їх реального технічного стану, яка повинна включати оцінювання їх цілісності та, що не менш важливо, якісних змін мікроструктурного стану металу в результаті розвитку деградаційних процесів у процесі експлуатації. Зміни в мікроструктурі матеріалу в ході експлуатації викликають часто деформації-руйнування, зародження і розвиток мікропошкоджень, які відбиваються у відповідних змінах фізичних та механічних властивостей.

Можливість застосування фізичних методів контролю для оцінки незворотних змін мікроструктури та деградації механічних характеристик базується на тому, що між зміною структурного стану металевих сплавів і зміною фізичних властивостей існує певний зв'язок.

Аналіз відомих методів та засобів контролю якості металевих сплавів показав, що:

- 1) Сучасні методи неруйнівного контролю (магнітний, акустичний, термоелектричний, вихрострумний) при їх індивідуальному застосуванні не дозволяють достатньо точно визначати параметри мікроструктури сталей;
- 2) Відсутня теоретична база, яка б дала змогу аналітично встановити взаємозв'язки мікроструктурних параметрів з відомими інформативними параметрами фізичних методів контролю;
- 3) Існуючі кореляційні залежності між окремими параметрами мікроструктури та окремими фізичними параметрами переважно встановлено експериментальним шляхом і носять емпіричний характер;
- 4) До найбільш перспективних методів контролю якості матеріалу металоконструкцій за станом мікроструктури можна віднести магнітні та електромагнітні методи, інформативні параметри яких найбільше залежать від стану мікроструктури;
- 5) Сучасний розвиток неруйнівних методів оцінки стану мікроструктури сталей спрямований на розробку комплексних методів, які передбачають врахування декількох інформативних параметрів одночасно, що відносяться до різних типів полів.

Тому метою подальшої роботи є удосконалення методу оцінювання технічного стану елементів нафтогазового обладнання, яке працює в важких умовах циклічного навантаження (установки для буріння та ремонту свердловин, обладнання для видобутку нафти штанговими свердловинними насосами, трубопроводи), і виготовлених із таких марок сталей: Ст.3, Ст.4, сталь 10, 45, та низьколеговані типу 09Г2, 09Г2С, 10Г2С1, 40Г та 60Г, що передбачає урахуванням стану мікроструктури та якісної її зміни за комплексом інформативних фізичних параметрів шляхом встановлення їх взаємозв'язку з параметрами мікроструктури та розроблення методу контролю за визначеною залежністю. До переліку інформативних параметрів доцільно включити також твердість, яка характеризується стійким кореляційним зв'язком з мікроструктурою сталей.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЗМІН В МІКРОСТРУКТУРІ І ПОВ'ЯЗАНИХ З НИМИ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВІВ

Враховуючи специфіку незворотних змін мікроструктури сталей елементів нафтогазового обладнання у ході їх тривалої експлуатації, більш доцільним в плані збереження цілісності металу використовувати для оцінки цих змін структурночутливі та фазочутливі фізичні властивості. До перших відносяться властивості, що реагують на зміну ступеня спотвореності кристалічної ґратки, на концентрацію домішкових атомів, порядок у розташуванні атомів компонентів, на розмір зерна, на появу частинок надмірної фази, зміна їх дисперсності та на інші особливості мікроструктури. Структурночутливими властивостями є електричні, акустичні, гальваноманітні, деякі магнітні властивості (наприклад, коерцитивна сила), внутрішнє тертя.

Фазочутливі фізичні властивості дозволяють з високою точністю фіксувати зміну складу фаз і кількісного співвідношення між ними, тобто фазового складу сплавів. До таких властивостей насамперед слід віднести намагніченість насичення [48].

Проведений в розділі 1 аналіз показав, що жоден із відомих методів при їх індивідуальному застосуванні не дає змогу достовірно визначати кількісні характеристики мікроструктури, оскільки вони ґрунтуються на тісних кореляційних залежностях між вибраним інформативним параметром  $i$ , в основному, механічними характеристиками тільки для окремої марки сталі або груп сталей, і тим самим можуть не поширюватися на інший асортимент сталевих виробів. Багатопараметрові магнітні методи поширюються тільки на магнітні матеріали. Тому, з даної точки зору, перспективними та універсальними видаються комплексні методи [50]. Комплексні підходи дають змогу підійти до проблеми визначення кількісних параметрів мікроструктури більш ширше за рахунок того, що інший досліджуваний параметр перекриває

певні обмеження попереднього, тим самим збільшуючи достовірність результатів контролю. При цьому можна застосовувати інформативні параметри, що належать до різних типів фізичних полів (електричний, магнітний тепловий тощо).

## 2.1 Дослідження особливостей фазових перетворень в гетерогенних сплавах та властивостей твердих розчинів

Фазові перетворення в твердому стані відбуваються через утворення зародків критичного розміру і їх ріст [52]. Необхідною умовою появи зародків нової фази є наявність теплових і концентраційних флуктуацій, термодинамічного фактора (різниці вільних енергій фаз) і забезпечення необхідного переохолодження або перегрівання. В той же час на фазові реакції в твердих тілах, окрім об'ємних і поверхневих ефектів зміни вільної енергії, чинять вплив: зміна пружної енергії кристалічної ґратки у зв'язку з появою нової фази, зміна дифузійної рухливості атомів, а також ступінчастий характер фазового перетворення. Слід відмітити, що потенційними місцями утворення зародків нової фази можуть бути границі зерен, двійників, дефекти «упакування», дислокації і т. п., оскільки проявляються відмічені вище термодинамічні концентраційні чинники, а також кінетичний фактор, пов'язаний з підвищеною швидкістю дифузії на дефектах кристалічної решітки.

Розглянемо властивості твердих розчинів. У твердих розчинах на базі феромагнітного металу спостерігається зниження намагніченості насичення, якщо розчинений діамагнітний метал.

Число магнетонів Бора на один атом (величина, пропорційна намагніченості насичення при абсолютному нулі) зменшується пропорційно атомному вмісту домішки, причому це зменшення тим значніше, чим більша валентність домішки [52]. Знайдена в нікелевих розчинах закономірна зміна намагніченості швидше є виключенням, ніж правилом. У інших випадках є складніші залежності, що станом на сьогодні не піддаються розрахунку.

Особливо це відноситься до розчинів парамагнітних (перехідних) і феромагнітних домішок у феромагнетику, як це часто є випадком у залізобуглецевих сплавах. Можна тільки сказати, що введення парамагнітних і діамагнітних домішок знижує намагніченість насичення  $j_s$ .

Якщо гетерогенний сплав у стані впорядкування піддати пластичній деформації [12], то величина магнітного насичення знижується тим більше, чим більша ступінь деформування. Це пояснюється тим, що при наклепі відбувається порушення порядку в розташуванні атомів. У заздалегідь загартованих на невпорядкований твердий розчин сплавах магнітне насичення при наклепі майже не змінюється.

Намагніченість насичення твердих розчинів, як і чистих металів, не є структурночутливою властивістю і практично не залежить від наклепу (у відсутності впорядкування), величини зерна, кристалічного орієнтування і т. д.

Константи анізотропії і магнітострикції також можна вважати структурно нечутливими властивостями. Вони залежать від складу феромагнітного твердого розчину, хоча вказати на якісь загальні закономірності цієї залежності в даний час не представляється можливим. В більшості випадків константа анізотропії зменшується із збільшенням легованості сплаву.

Згідно з емпіричним правилом, хімічні сполуки феромагнетиків з парамагнітними і діамагнітними металами і проміжні фази з досить вираженим хімічним зв'язком (з великою теплою утворення) парамагнітні.

## 2.2 Дослідження властивостей гетерогенних сплавів

У гетерогенних сплавах величина намагніченості насичення як властивості структурно нечутливої адитивно складається з відповідних величин для фаз, що становлять сплав. Для кількісного фазового аналізу користуються величиною  $I_s$  [52]

$$I_s V = I_s V' + I_s V'' + \dots, \quad (2.1)$$

де  $V, V', V'', \dots$  – об'єми сплаву і фаз, що становлять сплав;  $I_s, I'_s, I''_s$  і т. д. – відповідні їм намагніченості насичення.

Точка Кюрі залежить тільки від складу феромагнітної фази і не залежить від складу сплаву, що знаходиться в певній гетерогенній області діаграми фазової рівноваги, якщо ця рівновага досягається при нагріванні [44]. При наявності в сплаві декількох феромагнітних фаз число точок Кюрі дорівнює числу цих фаз.

Температурна залежність  $I_s$  гетерогенного сплаву складається з відповідних залежностей для кожної фази.

Сталь і білий чавун, наприклад, складаються з двох феромагнітних фаз: фериту і цементиту. Описане у формулі (2.1) співвідношення часто використовують для експериментального визначення глибини відбілювання сірого чавуну, тобто визначаються частки фаз за значеннями їх намагніченості насичення, приймаючи загальний об'єм за 100%.

Магнітострикція сплаву  $\lambda_s$  також адитивно складається з відповідних величин фаз, що становлять сплав.

Що стосується структурночутливих властивостей – передусім коерцитивної сили – гетерогенних сплавів, то вони залежать від величини і градієнта напружень, дисперсності фаз, ізольованості феромагнітних кристалів і інших чинників, вплив яких був розглянутий в розділі 1.

Слід відмітити, що коерцитивна сила практично не залежить від концентрації твердого розчину заміщення, якщо  $K$  і  $\lambda_s$  змінюються слабо. Вона різко зростає при появі другої фази, яка розподіляється між кристалами основної феромагнітної фази. При цьому, чим більше надлишкової фази, тим вище  $H_c$ .

В деяких випадках спостерігається паралелізм в зміні твердості і коерцитивної сили. У міру збільшення вмісту домішки, тобто при зростанні кількості надлишкової фази в гетерогенній суміші, росте як коерцитивна сила, так і твердість. Дослідження [12] показують, що  $H_c$  і  $H_B$  можуть зростати з різною інтенсивністю залежно від міри дисперсності надлишкової фази.

Істотним в цьому зіставленні є те, що твердість росте при збільшенні концентрації і в гомогенній області, тоді як  $H_c$  залишається постійною до появи надлишкової фази. У відпалених гетерогенних сплавах за твердістю не можна помітити різких змін її значень. В цьому випадку коерцитивна сила дає різкіші зміни, оскільки її величина в гомогенній області не змінюється.

У випадку гетерогенних сумішей значення  $H_B$  і  $H_c$  поведуться аналогічно – вони зростають із збільшенням кількості і міри дисперсності включень. Те ж відноситься і до спотворень просторових ґраток, що виникають при наклепі і гартуванні:  $H_B$  і  $H_c$  зростають разом з підвищенням міри наклепу. Що стосується гомогенних  $\alpha$ -сплавів, то тут  $H_B$  і  $H_c$  по своїй поведінці різко розходяться.

Дослідження розпаду переохолодженого твердого розчину можна проводити кількісно, якщо для оцінки цього розпаду використовується величина будь-якої властивості, яка практично структурно нечутлива і реагує тільки на зміну фазового стану.

В умовах ізотермічного старіння  $H_c$  росте внаслідок збільшення кількості дисперсних кристалів, що виділяються внаслідок їх коалесценції.

## 2.3 Дослідження особливостей зміни структурночутливих властивостей внаслідок фазових перетворень

### 2.3.1 Дослідження зміни структурночутливих магнітних властивостей

Структурночутливі властивості ( $\mu$ ,  $H_c$ ,  $B_r$ ) визначаються технічним намагнічуванням. Структурно нечутливі властивості ( $I_s$ ,  $\theta_C$ ) залежать від обмінної взаємодії (спонтанний магнетизм) [54].

Основними структурночутливими магнітними властивостями є магнітна проникність  $\mu$ , коерцитивна сила  $H_c$ , залишкова індукція  $B_r$ . Оскільки низьковуглецеві сталі мають в основі фазову складову ферит, що є твердим розчином впровадження, а також він є фазовою складовою структури перліт, то

вивченню піддавалися магнітні властивості твердих розчинів. В твердих розчинах на базі феромагнітного металу спостерігається зниження намагніченості насичення, якщо в ньому розчинений діамагнітний матеріал. Крім того, збільшення концентрації розчинених неферомагнетиків в феромагнітних сплавах знижує точку Кюрі.

Встановлено, що пластична холодна деформація (нижча за температуру рекристалізації) викликає спотворення просторової ґратки [12]. Внутрішні напруження, обумовлені спотворенням ґратки, утруднюють процеси намагнічування і розмагнічування сталей і інших феромагнітних сплавів. Магнітна проникність  $\mu$  при наклепі знижується тим сильніше, чим більша величина деформації; коерцитивна сила  $H_c$ , навпаки, зростає з підвищенням величини деформації. На рисунку 2.1 [52] показані відповідні емпіричні залежності для  $H_c$  і  $\mu_{max}$ , отримані при випробуванні сталюго зразка із вмістом 0,07% С. Залишкова індукція поводить ся дещо своєрідно. При критичній величині деформації (близько 5 – 8%) вона різко падає, а при подальшому збільшенні наклепу поступово зростає.

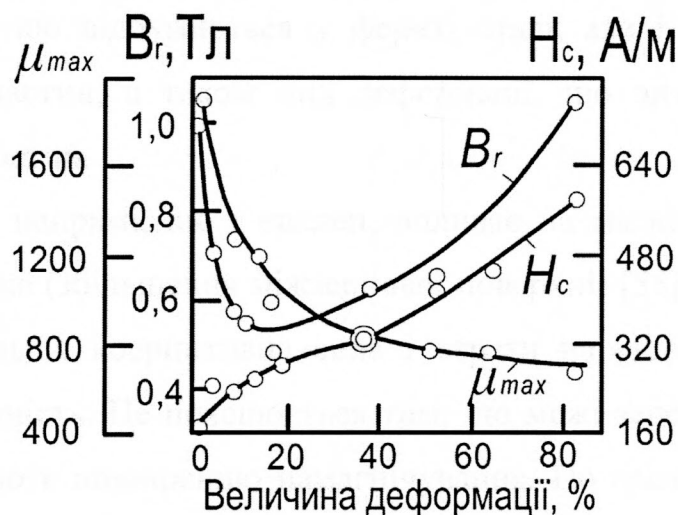


Рисунок 2.1 – Залежність магнітних властивостей сталюго зразка із вмістом 0,07% С від величини деформації при деформаційному наклепі

Зміна ж структурночутливих фізичних властивостей середньо- та високовуглецевих сталей значною мірою може визначатися не лише розмірами цементитних пластин, але і видом деформації [12]. Наприклад, коерцитивна

сила, яка залежить від багатьох чинників (пружних макро- і мікронапружень, розміру зерна, кількості і розміру цементитних часток, щільності дефектів кристалічної ґратки фериту, наявності пор та ін.), дуже різко реагує при деформації на утворення комірчастої структури у фериті і значно слабше збільшується при утворенні «лісу» дислокацій. При цьому визначальну роль грає не відносний характер зміни розмірів комірок, а їх абсолютна величина. При збільшенні кількості грубопластинчастого перліту (вміст вуглецю в сталі) середня абсолютна величина розміру осередків при деформації знижується, що і призводить до різкішого зростання коерцитивної сили при малих деформаціях в сталях з високим вмістом вуглецю, коли в надлишковому фериті і фериті перліту формується комірчаста структура. Зміна коерцитивної сили залежить від розміру цементитних пластин. При деформації сталі з грубопластинчастим цементитом, незалежно від виду деформації, коерцитивна сила росте до міри обтискання 70% і більше, тоді як в сталях з дрібнопластинчастим цементитом вид деформації істотно впливає на характер зміни коерцитивної сили

Таким чином, на зміну коерцитивної сили при деформації роблять вплив не лише зміни, що відбуваються у фериті сталі, але і кількість та розміри цементитних пластин, а також вид деформації, що визначає спрямованість цементитних пластин.

У тому ж напрямі, що і наклеп, впливає на магнітні властивості сталі подрібнення зерна (збільшення міжзернової поверхні) [55]. Чим дрібніше зерно фериту, тим більша коерцитивна сила і втрати на гістерезис, і тим менша магнітна проникність. Це пояснюється тим, що межі зерен також є чинником, що перешкоджають поширенню намагнічування. По границях зерен, на стику двох різно орієнтованих кристалітів, присутнє спотворення просторової ґратки.

У твердих розчинах впровадження коерцитивна сила росте разом із вмістом розчиненої домішки, причому значною мірою при малих концентраціях. Для отримання високої коерцитивної сили, наприклад, сталі – її треба гартувати на мартенсит, тобто отримувати сильно пересичений твердий розчин впровадження на базі  $\alpha$ -заліза.

У разі гетерогенних сумішей значення характеристик  $H_B$  і  $H_c$  поводяться аналогічно – вони зростають із збільшенням міри дисперсності включень. Те ж відноситься і до спотворень просторових ґраток, що виникають при наклепі і гартуванні:  $H_B$  і  $H_c$  зростають разом з підвищенням міри наклепу.

Вивчення магнітної проникності (чи сприйнятливості) при старінні сталей показує, що вона загалом поводить обернено коерцитивній силі. Залишкова індукція, як правило, зростає. Процес старіння детальніше може бути вивчений за допомогою магнітних вимірювань в сильних полях [12].

### 2.3.2 Дослідження зміни структурночутливих електричних властивостей

При вивченні зміни електричних характеристик в залежності від мікроструктурного стану встановлено, що електропровідність металу твердих розчинів знижується навіть в тому випадку, коли в металі  $A$  з низькою електропровідністю розчиняється метал  $B$  з високою електропровідністю. При розміщенні в просторових ґратках розчинника  $A$  чужих атомів розчиненої речовини  $B$  електричне поле ґраток розчинника спотворюється і розсіювання електронів збільшується.

Підвищення електроопору при утворенні твердого розчину (легуванні) може бути дуже значним. Спотворення ґраток є не єдиною причиною зростання електричного опору твердих розчинів. Електричні властивості твердого розчину обумовлені також хімічною взаємодією компонентів. Значний вклад у величину питомого електричного опору сплавів вносять також міжзернові границі та області концентраційної неоднорідності. Загальні закономірності зміни електричних властивостей, в залежності від структурного стану і хімічного складу сплавів, встановлені Курнаковим Н.С. у вигляді діаграм «будова – властивість» [52].

При наклепі питомий електричний опір твердих розчинів підвищується, а при відпалі – знижується. Цікаво відмітити, що при відпалі дуже часто опір змінюється сильніше, ніж при наклепі.

Ще значніша зміна електричного опору спостерігається при деформаційному наклепі впорядкованих твердих розчинів. При наклепі порядок в розташуванні атомів внаслідок відносного переміщення площин ковзання і окремих атомних площин порушується. При цьому електричний опір підвищується на десятки, а іноді і на сто з лишнім відсотків. При значній деформації опір сплаву наближається до опору загартованого сплаву, що знаходиться в нерівноважному стані. Таким чином, вивчення електричного опору і зміни його при наклепі має велике значення при дослідженні твердих розчинів, що піддаються деформаційному старінню.

Зменшення електропровідності при хімічній взаємодії компонентів пояснюється тим, що металічний зв'язок між атомами, принаймні частково, замінюється ковалентним або навіть іонним і концентрація носіїв струму, – вільних електронів, – зменшується. Ця зміна характеру міжатомного зв'язку при хімічній взаємодії металів призводить часто до того, що утворене з'єднання стає навіть напівпровідником [56].

Детальному вивченню піддавався розрахунок електричного опору двофазних пластинчатих структур, перш за все пластинчатого перліту. Якщо усі пластинки витягнуті уздовж напрямку струму (ідеальна фіброва структура), то, користуючись правилом адитивності, можна підрахувати електропровідність сплаву [53]

$$\gamma = c_1\gamma_1 + c_2\gamma_2, \quad (2.2)$$

де  $\gamma$  – електропровідність сплаву,  $c_1$  і  $c_2$  – об'ємна концентрація першої та другої фази (ферит та цементит),  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  – електропровідність першої та другої фази (ферит та цементит).

У випадку, якщо усі вони розташовані строго поперечно (ідеальна шарувата структура), то за правилом адитивності опір  $\rho$  визначається за формулою

$$\rho = c_1\rho_1 + c_2\rho_2, \quad (2.3)$$

де  $\rho_1$  і  $\rho_2$  – питомі електричні опори включених фаз.

Тоді для вуглецевої ферито-перлітної сталі формула для визначення питомого електричного опору матиме вигляд

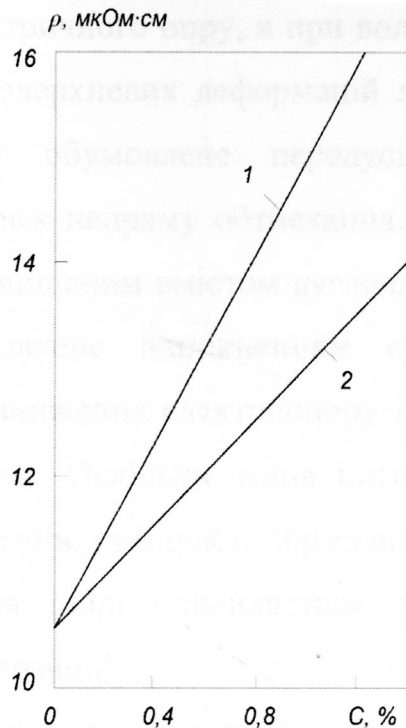
$$\rho = 2 \cdot (c_1 \cdot \frac{1}{\gamma_1}) + c_2 \cdot \frac{1}{\gamma_2} + \rho_3, \quad (2.4)$$

де  $\rho$  – питомий опір сплаву,  $c_1$  і  $c_2$  – об'ємна концентрація першої та другої фази (ферит та цементит);  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  – електропровідність першої та другої фази (ферит та цементит);  $\rho_3$  – питомий електричний опір границь зерен.

Третій доданок у формулі (2.4) зумовлений тим фактом, що значний вклад у величину питомого електричного опору сплавів вносять також міжзернові границі та області концентраційної неоднорідності.

Для вуглецевої сталі різниця результатів, отриманих за формулами (2.2) і (2.3), досягає 25 %. Значення електричного опору сталі з реальною, хаотично орієнтованою пластинчастою структурою знаходиться між підрахованими за формулами (2.2) і (2.3). При вмісті (0,6 – 0,7)% С опір сталі з пластинчастою структурою (перліту) приблизно на 10 % вище, ніж у сталі із зернистою структурою (наприклад, сфероїдизованого сорбіту), тоді як ідеальна шарувата структура (за розрахунком) дає перевищення на 20 % в порівнянні з сорбітом.

На рисунку 2.2 [46] приведений питомий опір вуглецевої сталі з пластинчастою і зернистою структурою. За умовами поставки металургійними заводами доевтектоїдна сталь в більшості випадків містить у відпаленому стані пластинчастий перліт, а заевтектоїдна – зернистий цементит на феритній матриці. Тому до концентрації 0,8% С електричний опір треба визначати по лінії 1 (рис.2.2), а при більш високій – по лінії 2.



1 – пластинчастий перліт;

2 – зернистий цементит на основі фериту

Рисунок 2.3 – Питомий електричний опір ферито-перлітної сталі з пластинчастою та зернистою структурою

Вплив наклепу і відпалу, як і слід було чекати, зменшується при потовщенні цементитних пластинок. Цікаво відмітити, що наклеп сталі, заздалегідь загартованої і відпущеної на сорбіт, також дещо знижує (на 1,3%) електричний опір, що пояснюється наявністю в сталі разом із зернистим деякої кількості пластинчастого цементиту і частковим утворенням при деформації смугастої структури [12, 52].

Наклеп сталі із вмістом від 0,1% до 0,3% С спочатку зменшує електричний опір, а потім його збільшує. Падіння визначається зростаючою орієнтованістю пластинчатого перліту, а підвищення – наклепу фериту. Воно тим більше, чим більше фериту, і зникає при високому вмісті вуглецю.

Своєрідно змінюється при пластичній деформації сталі з підвищеним вмістом вуглецю з пластинчатим цементитом питомий електричний опір, який повинен збільшуватися з ростом щільності дефектів кристалічної решітки. Однак при деформації стисканням в сталях з високим вмістом вуглецю не

спостерігається зміни електричного опору, а при волочінні нормалізованої сталі електроопір до великих поверхневих деформацій лише знижується [12]. Таке зменшення електроопору обумовлене передусім посиленням орієнтації цементитних пластин уздовж напрямку обтискання. Після значних деформацій (вище 75 %) в сталях з підвищеним вмістом вуглецю спостерігається зростання електроопору, яке обумовлене виникненням субмікротріщин. У деяких випадках спостерігається зниження електроопору і в низьковуглецевих сталях при невеликих деформаціях. Оскільки зміна питомого електроопору сильно реагує на концентрацію атомів домішок в нормальних позиціях впровадження, то такого роду зниження іноді викликається зменшенням вмісту атомів впровадження в твердому розчині.

Зміною електроопору при пластичній деформації металів пояснюється виникнення термо-ЕРС між деформованим і недеформованим зразком, тобто величина термо-ЕРС в даному випадку повинна змінюватися аналогічно зміні електроопору, що і спостерігається при деформації вуглецевих сталей з пластинчастою структурою.

Вимірюванням електропровідності можна вивчати не лише внутрішні перетворення, що йдуть при термічних обробках, але також явища, що відбуваються при дисперсійному збільшенні твердості феритних і аустенітних сталей, що не зазнають алотропних перетворень. Двофазна система, що вийшла в результаті перетворень і розпаду первинної фази, може мати більший електричний опір, ніж початковий твердий розчин. Цей ефект може бути значним, якщо фаза, що виділяється, розташовується по границях зерен твердого розчину, що й зумовлюється збільшення питомого електричного опору за рахунок додаткових границь між зернами (формула (2.3)). У розглянутому випадку коерцитивна сила також реагує сумарно і на кількість надмірної фази, що виділилась з  $\alpha$ -заліза, і на її дисперсність, тоді як електроопір, в основному, вказує на міру розпаду твердого розчину, тобто на кількісне співвідношення фаз в гетерогенній суміші [57].

Не зачіпаючи змін інших структурночутливих фізичних характеристик при деформації (наприклад, залишкову індукцію, магнітну проникність та ін.), слід зробити загальний висновок, що розміри, кількість і характер розподілу, а також орієнтація пластин цементиту грає істотну роль в зміні фізичних властивостей сталі при її деформації.

### 2.3.3 Дослідження змін структурночутливих температурних властивостей

При наявності загальної аналогії між *електропровідністю* і *теплопровідністю*, остання змінюватиметься при зміні хімічного складу і фазового стану сплаву, в основному, за тими ж якісними закономірностями, що і *електропровідність*.

У безперервному ряді неупорядкованих твердих розчинів сплавів *теплопровідність* знижується тим більше, чим більше склад сплаву відрізняється від чистих компонентів. Тут, як і для електропровідності, теплопровідність компонентів різко знижується при введенні домішок навіть в порівняно невеликих кількостях. Подальше підвищення концентрації твердого розчину впливає на теплопровідність значно менше. У безперервному ряді твердих розчинів з залізом мінімум теплопровідності може спостерігатися при концентрації, відмінній від 50% заліза.

У зв'язку із залежністю теплопровідності від хімічного складу, а також фазового та структурного стану сплаву, її вимірювання може бути використане, аналогічно до електропровідності, для дослідження фазових і структурних перетворень в сплавах. В окремих випадках вимірювання теплопровідності дозволяє одержати інформацію, яку неможливо отримати іншими методами. Наприклад, дослідження ранніх стадій виділення в дисперсійно-твердіючих сплавах методом вимірювання електроопору не дозволяє провести відмінності між можливими процесами, в яких беруть участь точкові дефекти; не завжди можливо також розділити вклад точкових дефектів і дислокацій. Отже,

гратчаста складова теплопровідності чутлива до присутніх в металах і сплавах дефектів кристалічної будови [52].

#### 2.4 Структурна чутливість фізичних характеристик гетерогенних сплавів

Попередні теоретичні дослідження показали [12, 53-54], що взаємозв'язок між фізичними та механічними характеристиками необхідно розглядати з точки зору їх структурної чутливості.

Проаналізуємо зв'язок мікроструктурного стану та механічних характеристик конструкційних сталей на прикладі аналізу залежності границі плинності  $\sigma_T$  від структури сталей. Границя плинності залежить від структури і, перш за все, від розмірів зерен фериту.

Так, границя плинності металу, який складається з однорідних зерен, описується рівнянням Петча-Холла-Лоу [57]

$$\sigma_T = \sigma_o + K_y d_\alpha^{-1/2}, \quad (2.5)$$

де  $\sigma_o$  - напруження тертя (опір решітки твердого розчину руху дислокацій);

$K_y$  - коефіцієнт, що визначається енергією взаємодії дислокацій з границями зерен (майже однаковий для різних сталей);

$d_\alpha$  - середній діаметр зерна.

Для даного рівняння справедливе твердження: якщо в об'ємі зерна структура незмінна, то міцність зростає при зменшенні розміру зерна. З іншого боку, відмінність границь плинності вуглецевої та низьколегованої сталей, що володіють різною мікроструктурою, обумовлена, головним чином напруженням тертя  $\sigma_o$ .

Виникнення більш високих напружень пояснюється наявністю кремнію і марганцю в розчині. Введення 1% кожного із цих елементів підвищує напруження тертя заліза на 84 і 32 МПа відповідно [11].

Механічні характеристики, такі як границя міцності та границя плинності найбільш поширених низьковуглецевих конструкційних сталей з ферито-перлітною структурою, можна визначити за розміром зерна та кількістю перліту. При введенні різних легуючих елементів змінюються механічні властивості металів. Кремній зміцнює розчин, але збільшує розмір зерна фериту. Марганець підвищує границю плинності за рахунок зміцнення твердого розчину, подрібнення кількості перліту в мікроструктурі [59].

Властивості сталі залежать також від кількості, дисперсності розподілу карбідів, що змінюються в широких межах залежно від режимів термооброблення, тривалості експлуатації та ін. Перехід легуючих елементів з твердого розчину в карбіди, коагуляція карбідів і зосередження їх по границях зерен, а також зміна тонкої структури обумовлюють зміну механічних характеристик – зниження пластичності при незначній зміні границі міцності та твердості [44].

Таким чином, структурні складові та параметри, які визначають тип структури (феритна, дуплексна, аустенітна, мартенситна), відповідно визначають величину напруження тертя  $\sigma_0$ , значення якого є приблизно однаковим в межах однотипних структур. Це пояснює те, що найбільш тісні кореляційні зв'язки між механічними та фізичними характеристиками існують тільки в межах однотипних структур, в яких фазовий склад і тип структури однаковий, а змінюються лише кількісні чи розмірні співвідношення структурних складових [55].

## Висновки до розділу 2

Теоретичні дослідження щодо зміни фізичних властивостей сталей в залежності від перетворень в мікроструктурі дають можливість зробити такі висновки:

1) у гетерогенних сплавах структурно нечутливі властивості адитивно складаються з відповідних величин для фаз, що становлять сплав, що дає можливість визначати фазові концентрації сплавів;

2) наклеп та подрібнення зерна суттєво впливають на магнітні властивості сталі, що дає можливість за значеннями цих параметрів оцінювати зміни розмірів і форми зерен;

3) у твердих розчинах впровадження коерцитивна сила росте разом із вмістом розчиненої домішки, причому значною мірою при малих концентраціях, що робить коерцитивну силу високочутливою характеристикою до зміни фазового складу сплаву;

4) електропровідність металу твердих розчинів знижується про появі в сплаві з низькою електропровідністю домішки чи включення з високою електропровідністю;

5) вимірюванням електропровідності можна вивчати не лише внутрішні перетворення в процесі експлуатації, але також явища, що відбуваються при дисперсійному збільшенні твердості феритних і аустенітних сталей;

6) теплопровідність змінюється при зміні хімічного складу і фазового стану сплаву в основному по тих же якісних закономірностях, що і електропровідність;

7) на основі результатів вивчення особливостей якісної зміни магнітних властивостей, електричного опору, теплопровідної характеристики та твердості, через відсутність аналітичних залежностей обрані параметри вибрані для подальших експериментальних досліджень щодо визначення кореляції між цими параметрами та параметрами мікроструктури.

### РОЗДІЛ 3

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ВСТАНОВЛЕННЯ АНАЛІТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ПАРАМЕТРАМИ МІКРОСТРУКТУРИ І ФІЗИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ СТАЛЕЙ

Метою експериментальних досліджень було визначення оптимальної кількості інформативних параметрів із запропонованих у другому розділі, які доцільно використовувати методом контролю стану металу, що передбачає комплексне врахування кількох інформативних параметрів, оскільки зміна одиночного параметру носить часто неоднозначний характер.

Відповідно до поставлених завдань і з метою забезпечення достовірності результатів досліджень, була розроблена методика проведення експериментальних досліджень, що передбачає виконання наступних етапів:

- лабораторні вимірювання комплексу фізико-механічних параметрів, таких як: коерцитивна сила  $H_c$ , твердість  $HB$ , питомий електричний опір  $\rho$ , теплопровідна характеристика  $T$  (розраховується за вимірними значеннями кривих теплопереносу), магнітний індуктивний параметр  $I$  (визначається частотою електромагнітних коливань індуктивного перетворювача, що взаємодіє з об'єктом контролю), які є структурночутливими для феромагнітних сталей;

- металографічні дослідження зразків досліджуваних сталей з подальшим цифровим обробленням мікрофотографій структури для одержання кількісних параметрів мікроструктури: відношення відсоткових частин від загального об'єму структурних складових перліт/ферит ( $P/Fe$ ) та середній діаметр зерна  $d$  з підвищеною достовірністю результатів;

- графоаналітичні дослідження з метою встановлення характеру взаємозв'язків між запропонованими параметрами;

- встановлення аналітичної залежності між досліджуваними фізичними параметрами та параметрами мікроструктури.

Комплекс досліджень виконувався на зразках доевтектоїдних вуглецевих та низьколегованих сталей, які використовують для нафтогазового обладнання, що працює в складних умовах циклічних навантажень, і схильні до деформаційного старіння. Марки досліджуваних сталей та область їх застосування наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Перелік конструкційних сталей, що піддавались дослідженням

Марка сталі	Застосування	Нормативний документ, що регламентує властивості
Сталь 10пс	Перехідні муфти	ГОСТ 1050-88
Сталь 10	Рама верстата-гойдалки	ГОСТ 1050-88
Сталь 09Г2С	Стінки, днища резервуарів, стаціонарні покрівлі, плаваючі покрівлі резервуарів	ГОСТ 19281-89
Ст3пс	Зварні і штамповані рами, каркаси бурових веж, корпуси редукторів, станини бурових установок	ГОСТ 380-71
Ст4пс	Гаки кронблоку, шатун верстата-гойдалки	ГОСТ 380-71
Сталь 09Г2	Трубні елементи	ГОСТ 19281-89
Сталь 10Г2С1	Труба для трубопроводів	ГОСТ 19282-73
Сталь 40Г	Привідні та проміжні вали лебідок, шків талевого блока	ГОСТ 4543-71
Сталь 45	Муфти насосних штанг, ствол і перевідник вертлюга, штоки насосів	ГОСТ 1050-81
Сталь 60Г	Гальмівний барабан та шків лебідки	ГОСТ 14959-79

Зразки матеріалів для досліджень були вирізані з елементів обладнання, що демонтувалися в ході виконання різних ремонтних заходів, з промислових трубопроводів аварійних запасів та експлуатованих, а також зразків листових прокатів з вказаних марок сталей в стані поставлення.

### 3.1 Вимірювання фізико-механічних характеристик досліджуваних сталей

У ході визначення фактичних значень фізичних і механічних характеристик було проведено:

- вимірювання твердості поверхневого шару;
- вимірювання магнітного індуктивного параметра [61];
- вимірювання коерцитивної сили;
- вимірювання теплопровідної характеристики [62];
- вимірювання питомого електричного опору металу зразків [63].

Важливо відмітити, що для визначення фізичних і механічних характеристик металу зразків використовувалися неруйнівні методи і засоби, які базуються на різних фізичних принципах [64].

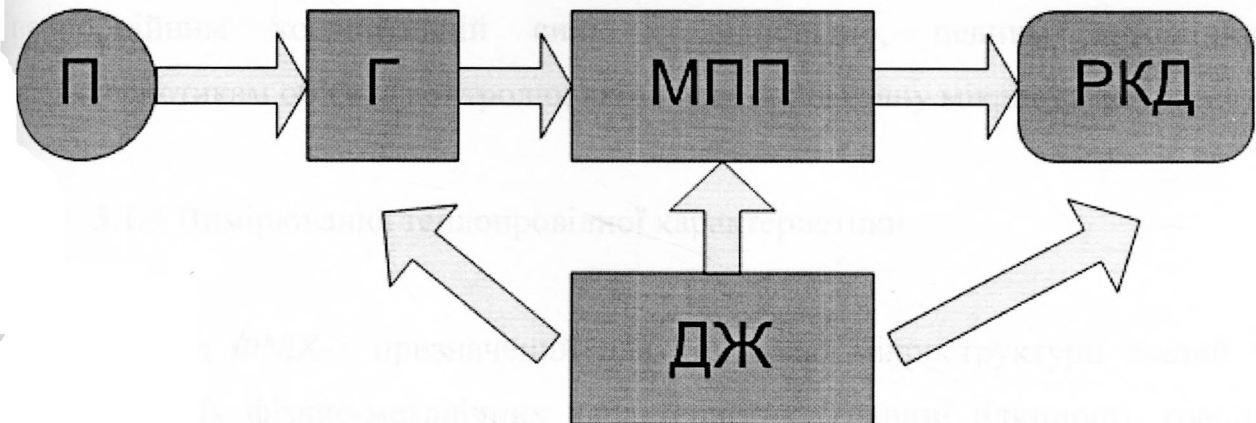
#### 3.1.1 Вимірювання твердості

Виходячи з умов процесу контролю, відомо, що твердість необхідно вимірювати з точністю до одиниць за шкалою Брінеля. Для цієї мети можуть бути використані динамічні твердоміри типу ТДМ-1 чи контактні резонансні твердоміри типу ТКР-35, які дадуть змогу виконувати вимірювання твердості за шкалою Брінеля в діапазоні (90 – 450) НВ, що є прийнятним. Запропоновані прилади є компактними і зручними у використанні, у них передбачені внутрішня енергонезалежна пам'ять та зв'язок із ПК.

#### 3.1.2 Вимірювання магнітного індуктивного параметра

Вимірювання інформативного параметра  $I$  здійснювалось за допомогою розробленої експериментальної установки ІВС-І2, принцип роботи якої ґрунтується на встановленій експериментальним шляхом залежності частоти електромагнітних коливань індуктивного контуру перетворювача від фазово-структурного складу та механічних характеристик матеріалу

металоконструкцій. Блок-схема експериментальної установки зображена на рисунку 3.1.



*П – індуктивний перетворювач;*

*Г – автоколивний генератор;*

*МПП – мікропроцесорний пристрій;*

*РКД – рідкокристалічний дисплей;*

*БЖ – джерело живлення.*

Рисунок 3.1 – Блок-схема експериментальної установки ІВС-І2

### 3.1.3 Вимірювання коерцитивної сили

Найпоширенішими, станом на сьогодні, є коерцитиметри з приставним електромагнітом, які є зручними для застосування у виробничих умовах. П-подібний електромагніт, на бокових стержнях якого розміщена збуджуюча обмотка, призначений для створення намагнічуючого та розмагнічуючого полів. Ферозонд, увімкнений за схемою полеміра, є перемичкою цього електромагніту. Під час пропускання постійного струму через обмотку збудження намагнічується ділянка об'єкта контролю. Після вимкнення струму в обмотці в магнітному полі електромагніту утворюється залишковий магнітний потік, який спричинює сигнал на виході ферозонда. Під час пропускання по обмотці збудження струму протилежного напрямку починається процес розмагнічування. Струм розмагнічування збільшують доти, поки магнітний потік у колі не дорівнюватиме нулю, а сигнал на виході ферозонда при цьому – відсутній. Чим більше значення коерцитивної сили матеріалу, тим більшим

повинен бути струм розмагнічування. Таким чином, робота коерцитиметра ґрунтується на використанні кореляції між струмом розмагнічування, який є пропорційним коерцитивній силі  $i$ , відповідно, певним механічним характеристикам об'єкта контролю, які залежать від стану мікроструктури.

#### 3.1.4 Вимірювання теплопровідної характеристики

Прилад ФМХ-1 призначений для контролю мікроструктури сталей та визначення їх фізико-механічних характеристик (границі плинності, границі міцності) в режимі послідовного точкового вимірювання твердості та теплопровідності. Вимірювання твердості здійснюється за допомогою серійного твердоміра динамічного ТДМ-1. Вимірювання теплопровідності сталей здійснюється за допомогою блоку нагрівача (джерела теплової енергії) та блоку вимірювання теплопровідності. Комплексне врахування виміряних двох параметрів дозволяє визначати фізико-механічні характеристики сталей.

Основною перевагою такого способу контролю є можливість отримання інформації про властивості об'єкту, що забезпечує можливість одночасного розрахунку декількох його характеристик.

Суть контролю фізико-механічних характеристик сталей полягає у нагріванні поверхні об'єкту інфрачервоним випромінюванням та знятті в часі кривих теплопереносу за допомогою термодавачів. За виміряними значеннями кривих теплопереносу розраховується значення теплопровідності. Окремо вимірюється твердість об'єкту контролю. Отримані значення твердості та теплопровідності використовуються для визначення механічних характеристик (границі текучості, границі міцності) та мікроструктури сталі згідно з алгоритмом штучних нейронних мереж. Для даних досліджень прилад застосовувався тільки для вимірювання теплопровідної характеристики.

Прилад складається з блоку термодавачів, блоку нагрівача, блоку обробки інформації та твердоміра.

### 3.1.5 Вимірювання питомого електричного опору металу зразків

Визначення питомого електричного опору сталей рекомендується проводити з використанням установки (рисунок 3.2), яка складається з атестованого мікроомметра та контактної чотиризондової вимірювальної перетворювача.

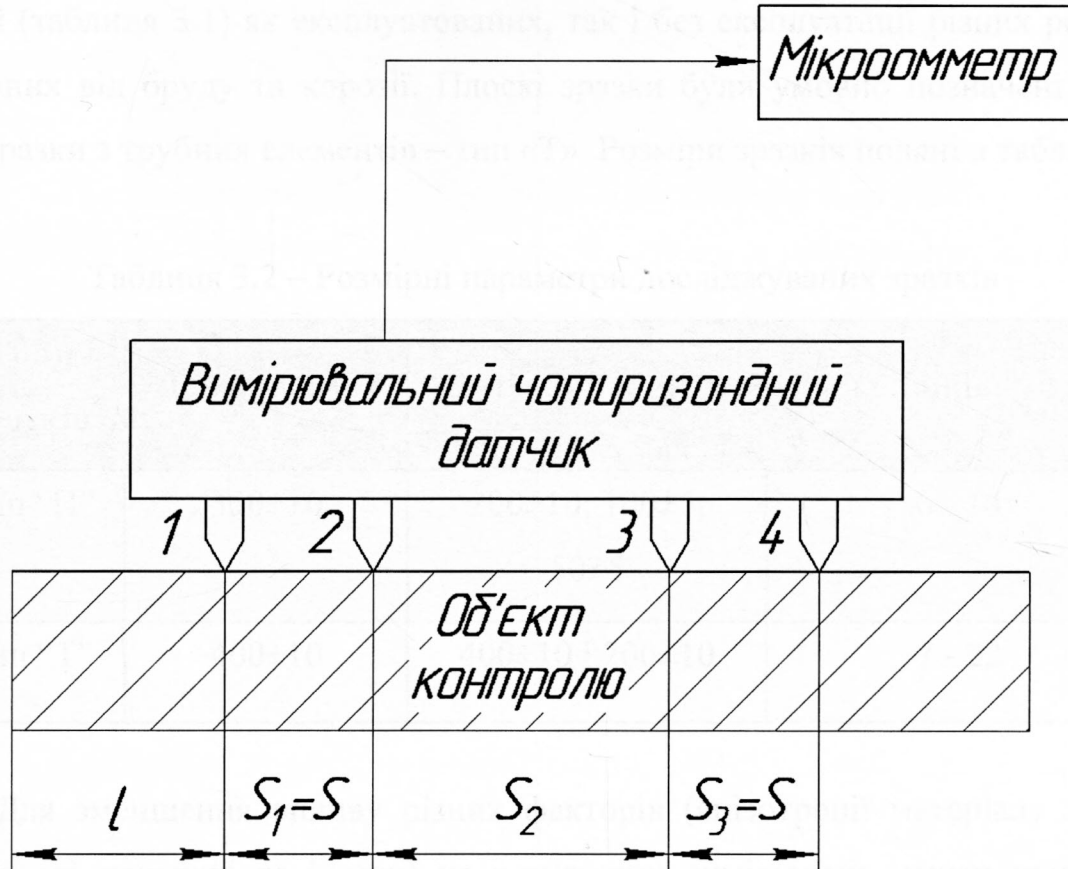


Рисунок 3.2 – Структурна схема установки для визначення питомого електричного опору сталей

Мікроомметр дозволяє вимірювати активний електричний опір на чотирьох діапазонах в одноразовому і багатократному режимах, проводити автокалібрування на зовнішніх еталонах. Принцип його роботи базується на визначенні значення падіння напруги від протікання через об'єкт постійного струму.

Зонди та упори вимірювального перетворювача виконані з можливістю ковзного переміщення відносно корпусу, що дозволяє проводити вимірювання

питомого електричного опору як на плоских, так і на циліндричних поверхнях, наприклад, трубах.

### 3.2 Технічні засоби для вимірювання фізичних інформативних параметрів

Згідно методики досліджень було відібрано 16 зразків конструкційних сталей (таблиця 3.1) як експлуатованих, так і без експлуатації різних розмірів, очищених від бруду та корозії. Плоскі зразки були умовно позначені як тип «П», зразки з трубних елементів – тип «Т». Розміри зразків подані в таблиці 3.2

Таблиця 3.2 – Розмірні параметри досліджуваних зразків

Типи зразків	Довжина, мм	Ширина, мм	Товщина, мм
Тип «П»	350±10	200±10; 100±5; 50±5	6 - 14
Тип «Т»	400±10	400±10 і 200±10	7 - 22

Для зменшення впливу різних факторів (анізотропії матеріалу зразків, шорсткості поверхні та інших) на результати вимірювань кожен зразок був поділений на 3 або 6 зон (рисунок 3.3). Зони контролю були зачищені від бруду і продуктів корозії. У кожній зоні були виконані десятикратні вимірювання фізичних параметрів всіма приладами, які були використані в ході досліджень. Вимірювання проводились в однакових лабораторних умовах при температурі (21±2) °С.

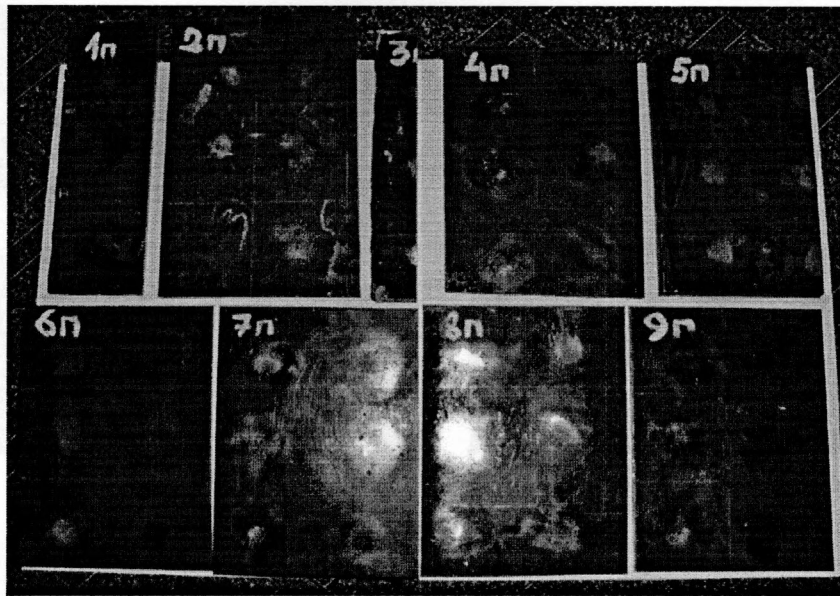


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд сталевих зразків досліджуваних сталей із розташуванням зон контролю

Визначення фізичних і механічних параметрів відібраних зразків проводились з використанням наступних технічних засобів:

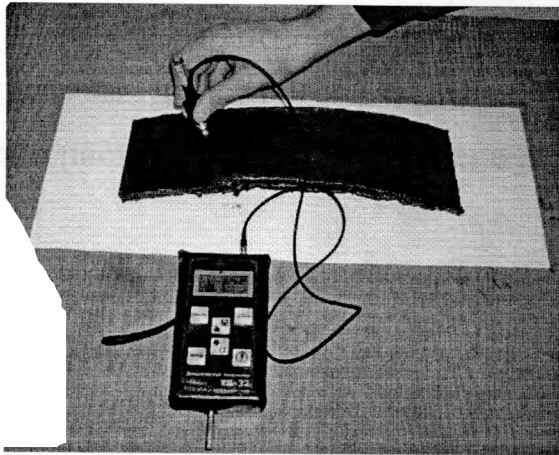
- твердомір динамічний ТД-32 (зав. № 398, НВФ „Ультракон-Сервіс”, м.Київ) (рисунок 3.4, а). Загальний вигляд та основні технічні характеристики даного твердоміра наведено в додатку А;

- твердомір контактно-резонансний ТКР-35 (зав. № 096, НВФ „Ультракон-Сервіс”, м.Київ) – рисунок 3.4, б). Загальний вигляд та основні технічні характеристики даного твердоміра наведено в додатку А;

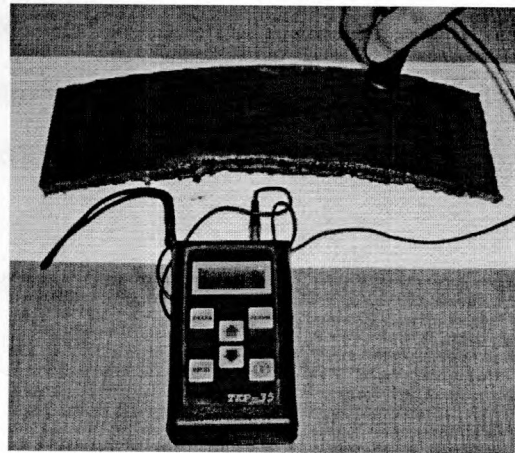
- експериментальна інформаційно-вимірювальна система для ІВС-І2 для вимірювання індуктивного параметру  $I$  (рисунок 3.4, в). Загальний вигляд та основні технічні характеристики даної ІВС наведено в додатку Б;

- коерцитиметр КРМ-Ц-К2М (зав. № 3006, НВФ „Спеціальні наукові розробки”, м.Харків) – (рисунок 3.4, г). Загальний вигляд та основні технічні характеристики коерцитиметра наведено в додатку В;

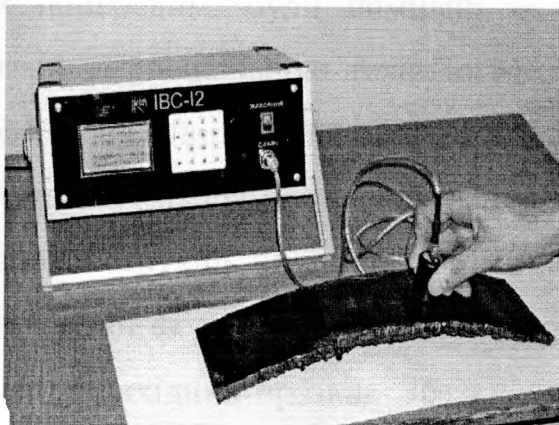
- інформаційно-вимірювальна система ІВС ФМХ-1 з нагрівальним блоком для вимірювання умовної теплопровідної характеристики (рисунок 3.4, д). Загальний вигляд та основні технічні характеристики даної ІВС наведено в додатку Г;



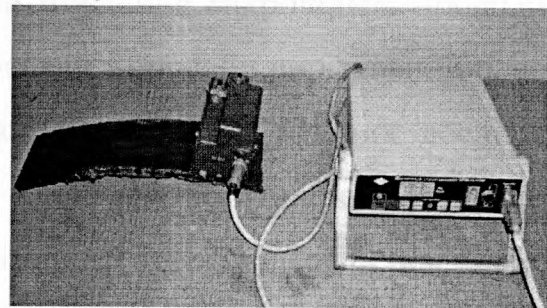
а)



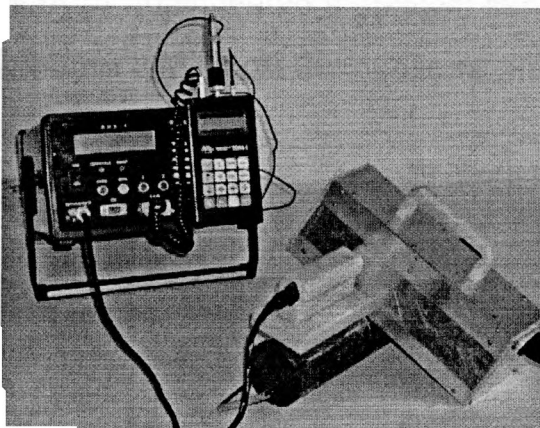
б)



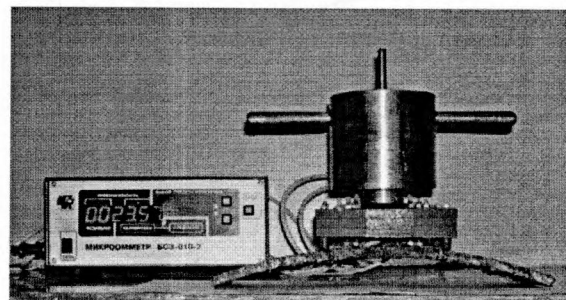
в)



г)



д)



е)

а) – твердомір ТД-32; б) – твердомір ТКР-35; в) – експериментальна установка ІВС-12; г) – коерцитиметр КРМ-ЦК; д) – інформаційно-вимірjuвальна система ІВС ФМХ-1; е) мікроомметр БС3-010-2

Рисунок 3.4 – Загальний вигляд засобів для вимірювання фізико-механічних характеристик досліджуваних зразків

- мікроомметр БСЗ-010-2 (зав. №135) зі спеціальним контактним механізмом (рисунок 3.4, е) Загальний вигляд та основні технічні характеристики даної ІВС наведено в додатку Д.

### 3.3 Металографічні дослідження для визначення кількісних параметрів мікроструктури

Наступним етапом досліджень була металографія. Із сталевих зразків, на яких попередньо були виміряні їх фізичні інформативні параметри, були вирізані за спеціальною технологією [66] зразки для одержання мікрошліфів. Вибір місця вирізування зразків для виготовлення мікрошліфа проводився із урахуванням напрямку прокатування пластин і способу вирізування пластин із металоконструкції чи листа [65]. Зразки для металографічних досліджень – прямокутної форми, розміром поверхні 12x12 мм, товщиною в залежності від товщини вихідних зразків. Зразки вирізалися з тіла пластин на відстані не менше 50 мм (рисунок 3.5) від крайових зон, на яких мікроструктура металу могла бути порушеною в процесі вирізування пластин із об'єктів термічним чи механічним способом без охолодження [11].

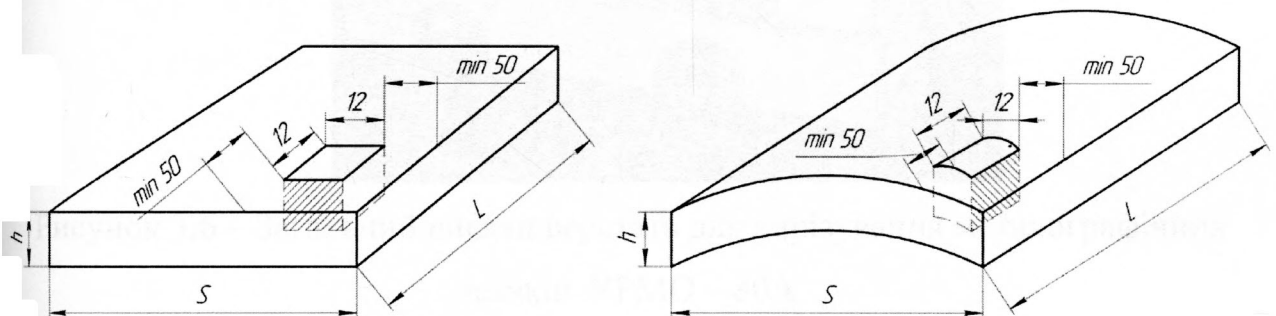


Рисунок 3.5 – Схема вирізування зразків із плоских і трубних пластин для металографічних досліджень

Вирізування зразків проводилось на спеціальному верстаті для вирізування металографічних зразків (Q-80Z (УРМО-80А)) (рисунок 3.6) (додаток Е), який забезпечує автоматичне підтримування заданої швидкості різання відрізним абразивним кругом і інтенсивне охолодження зразка в

процесі різання охолоджуючою рідиною для запобігання спотворення мікроструктури металу в зоні різання.

Вирізані зразки піддавалися подальшому шліфуванню і поліруванню поверхонь по товщині стінки (на рисунку 3.5 заштрихована ділянка). При цьому вищевказані операції не повинні деформувати і спотворювати структуру металу поверхні зразка, що повинно забезпечуватись плавним натисканням зразка всією плоскою поверхнею до абразивного матеріалу.

Процес шліфування проводився на пристрої для шліфування та полірування металографічних зразків УШПО-1 (рисунок 3.7) (додаток Ж) з використанням шліфувального паперу з розміром зерна, що поступово зменшувався [67], і подачею охолоджуючої рідини для запобігання локального перегріву поверхні металу. Швидкість обертання диска пристрою  $600 - 700 \text{ хв}^{-1}$ .



Рисунок 3.6 – Загальний вигляд верстата для вирізування металографічних зразків УРМО – 80А

Промиті і просушені зразки після шліфування піддавалися подальшому поліруванню на пристрої УШПО-1 з використанням фетрового круга, змоченого суспензією дистильованої води і дрібнодисперсного порошку оксиду алюмінію. Швидкість обертання диска пристрою не перевищувала  $600 \text{ хв}^{-1}$ .



Рисунок 3.7 – Загальний вигляд пристрою для шліфування і полірування металографічних зразків УШПО – 1

Підготовлені поверхні металографічних зразків для виявлення мікроструктури піддавались хімічному травленню 5%-ним спиртовим розчином пікринової кислоти [68].

Мікрофотознімки одержані на металографічному мікроскопі ММО-1600АТ (додаток 3) з допомогою цифрової камери КММ-5 (рисунок 3.8) для металографічного мікроскопа при збільшеннях 100, 200 і 400. Металографічний мікроскоп серії ММО-1600АТ застосовується в металографії для ідентифікації і аналізу структури різних металів і сплавів з діапазоном збільшення  $100^x - 1600^x$  при візуальному спостереженні і  $100^x - 1000^x$  при фотографуванні.

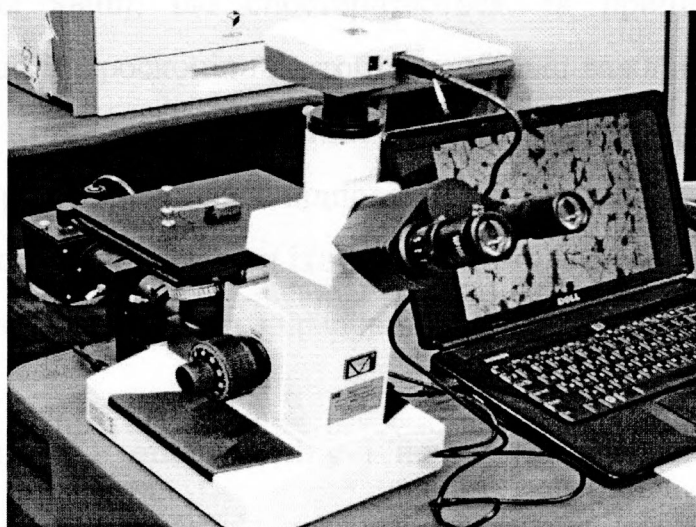


Рисунок 3.8 – Загальний вигляд металографічного мікроскопа ММО-1600АТ в комплекті з цифровою камерою КММ-5

Зображення мікроструктур, одержаних в процесі металографії, наведені в додатку К.

Виходячи з різних умов роботи металу по товщині стінки зразків, що були в експлуатації, дослідження їх мікроструктури проводилось пошарово, виділяючи шари, що примикають до зовнішньої і внутрішньої поверхонь зразка, а також шар, розташований в середній частині товщини стінки [72].

### 3.4 Методика обробки мікрофотознімків для визначення параметрів мікроструктури

Систематичні дослідження залежності між станом мікроструктури та функціональними (механічними) властивостями сплавів дають підстави припускати, що для отримання інформації про кількісні характеристики мікроструктур, пов'язаних певними функціональними властивостями, необхідно автоматизувати процес класифікації мікроструктур [69]. На відміну від звичайних методів, аналіз розмірів зерен із використанням систем аналізу зображень характеризується не тільки гнучкістю вимірювань, але й високою точністю і максимальною продуктивністю обробки зразків.

Окрім переваг методу контролю якості, кількісний підхід веде до глибшого розуміння явищ, що спостерігаються, їх причин та наслідків, особливо стосовно до макроскопічних, тобто найбільш важливих для практики поведінки металів. Крім того, кількісний підхід дає можливість виявити ту оптимальну структуру, яка найкраще відповідає умовам експлуатації матеріалу, та допомогти створювати нові сплави із заданим комплексом властивостей [74].

Методи аналізу, пов'язані із кількісною металографією, призначені для визначення:

лінійних розмірів, площ перетину і периметрів перетину структурних складових і фаз;

середніх радіусів сферичних частинок у матеріалі, що досліджується, та їхніх середніх об'ємів;

об'ємної частки частинок (фаз) у матеріалі та їхньої питомої поверхні; розподілу частинок матеріалу за розмірами, оцінка кутів орієнтації проточних фаз тощо;

периметрів і площ перерізів виробів, дефектів у ньому, його складових частин [73, 74].

Більшість із цих статистичних методів успішно застосовують і сьогодні, а принципи, що лежать в їх основі, використовують у сучасних обчислювальних пристроях. Для автоматизації процесу потрібно вирішити такі завдання: розпізнавання зерен на зображеннях мікрошліфів, визначення характеристик зерен, з'ясування взаємозв'язку між цими характеристиками і типом мікроструктури.

Основні кількісні параметри мікроструктури, а саме: середній діаметр зерна, бал зерна, співвідношення між структурною складовою перліт і фазовою складовою ферит визначалися за [69, 70] з використанням некомерційного програмного продукту ImageJ версії m1.45.

Розмір зерна – один з важливих показників якості кристалічних матеріалів (зокрема, металів), що безпосередньо впливають на експлуатаційні характеристики. Розмір зерна визначається за [70, 71] як середній діаметр зерна, і оцінюється в номерах шкали (балах) ГОСТу. Наприклад, бал 0 відповідає середньому діаметру зерна  $D = 352$  мкм, а бал 14 –  $D = 2,7$  мкм. Існують також негативні бали, наприклад бал мінус 3 відповідає  $D = 1$  мм.

Оскільки мікроструктура досліджуваних сталей характеризувалася здебільшого різнозернистістю, то розміри зерен характеризуватимуться середнім діаметром зерна.

Процес визначення параметрів мікроструктури автоматизувався можливостями вказаного вище програмного пакету.

**Опис процедури сегментації і аналіз зерен.** Процедура сегментації та аналізу складається з таких кроків.

- 1) Читаємо зображення та здійснюємо його попередню обробку.

Зображення конвертується із RGB формату в багатоградацийне (у разі потреби). Оскільки металографічні зображення часто характеризуються нерівномірністю освітлення, тому здійснюється попередня обробка зображення, така як покращення контрасту і яскравості з використанням функцій вкладки командного рядка Proccess.

## 2) Бінаризація зображення.

Зображення конвертується у бінарне з метою підготовки до виділення контурів (рисунку 3.9).

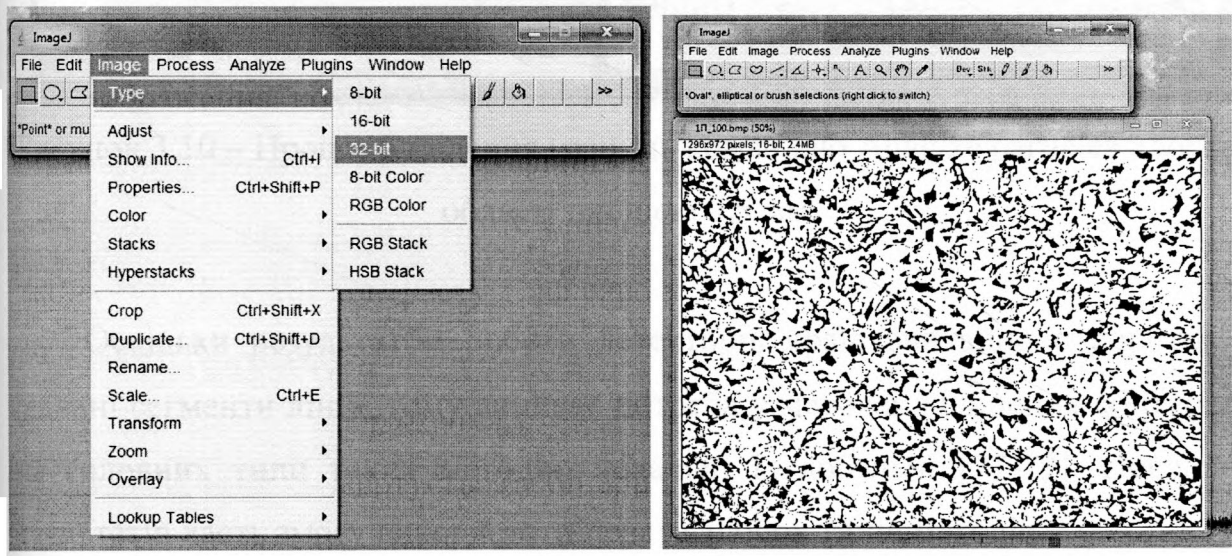


Рисунок 3.9 – Процес бінаризації металографічного зображення

Метод передбачає наявність на зображенні двох класів пікселів (фонові та нефонові). Використовуючи гістограму розподілу значень яскравостей пікселів растрового зображення, шукаємо оптимальний поріг, який розділяє ці два класи пікселів. До недоліків методу слід віднести «злипання об'єктів», особливо у місцях перетину, розмиття ліній та втрату тонких ліній [75].

## 3) Знешумлення.

Метою цього кроку є видалення пікселів, які не належать до об'єктів інтересу, з допомогою різних морфологічних операцій, таких як «fill holes», «dilation» тощо.

## 4) Пошук границь (виділення контурів).

Метою цього кроку є виділення границь і аналіз зображення в межах виділеної області (рисунку 3.10).

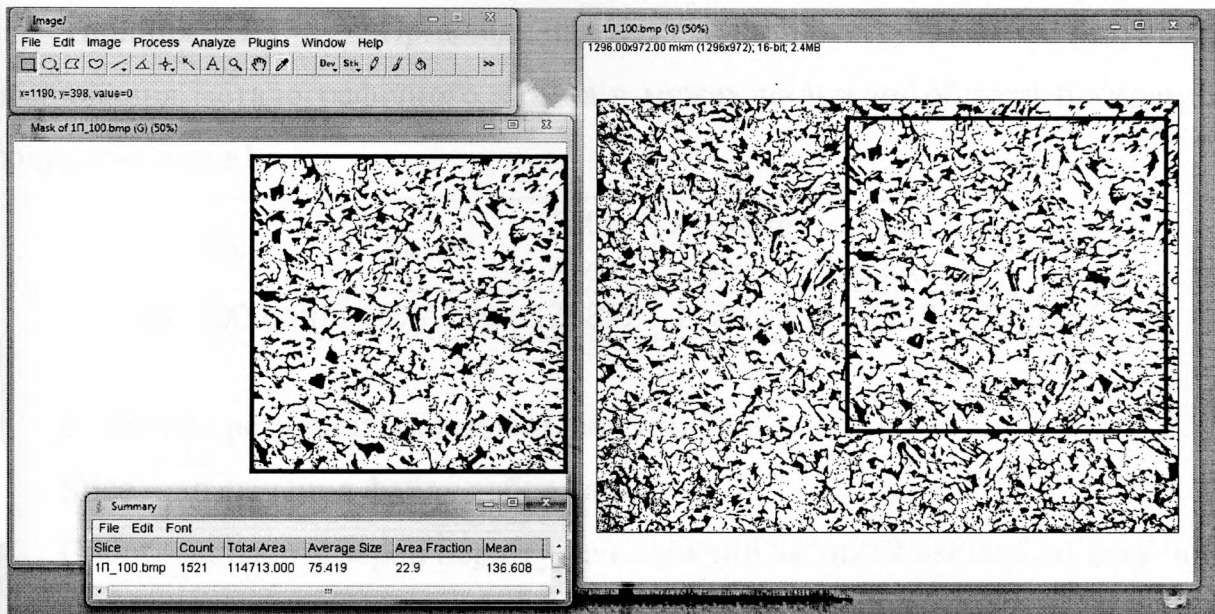


Рисунок 3.10 – Процес виділення границь командою Analyze particles в межах області площею  $0,5 \text{ мм}^2$

Оскільки результатом роботи детекторів країв звичайно є короткі, не з'єднані сегменти ліній, тому виникає потреба у методах виділення контурів. Є два головних типи таких методів: локальні і глобальні [77-79]. Поєднання результатів дасть змогу використати переваги обох типів методів.

##### 5) Вимірювання властивостей об'єкта (зерна) на зображенні.

Тут оцінюємо площу і центр об'єктів (зерен). Також обчислюємо інші статистичні властивості розпізнаних об'єктів на зображенні, зокрема площу, кількість, відсоткова частка на видимій зоні зображення, діаметр, тощо. Для визначення середнього діаметру зерна використовувався діаметр Фере, що визначається вбудованою відповідною функцією даного програмного продукту як метод січних.

Результати опрацювання зображення представлявся у вигляді, наведеному як приклад в таблиці 3.3 з усередненими параметрами, що піддавались вимірюванню. Результати відповідали параметрам перлітних темних зон зображення.

Таблиця 3.3 – Приклад представлення усереднених результатів опрацювання металографічного знімка в межах виділеної області програмним продуктом ImageJ

Slice	Count	Total Area	Average Size	Area Fraction	Feret
1П_100,bmp	1077,000	120852	112,212	15,917	14,915

В таблиці результатів наведені наступні дані:

Slice – позначення файлу зображення;

Count – кількість зерен перліту на виділеній видимій частині зображення;

Total Area – загальна площа, зайнята зернами перліту,  $\text{мкм}^2$ ;

Average Size – середнє значення площі зерна перліту,  $\text{мкм}^2$ ;

Area Fraction – частка площі виділеної зони зображення, зайнятої зернами перліту, %

Feret – середній діаметр зерна перліту, визначений методом січних (метод Фере),  $\text{мкм}$ .

Результати оцінки параметрів мікроструктури осереднювались за результатами вимірювань в 6-ти областях розміром  $0,5 \text{ мм}^2$  видимої частини кожного мікрофотознімка, одержаного з кратністю  $100\times$ .

В таблиці 3.4 наведено осереднені результати експериментальних досліджень на кожному зразку [81, 82], а саме: розраховані за результатами металографії середні значення відношень відсоткових часток по загальному об'єму структурних складових перліт/ферит (P/Fe), середні значення розміру зерна по кожному зразку (d), виміряні і осереднені значення твердості за шкалою Брінеля (НВ), середні значення коерцитивної сили (Hc), індуктивного параметру (I), теплопровідна характеристика (T) та значення питомого електричного опору ( $\rho$ ) за результатами вимірювань електричного опору на кожному зразку.

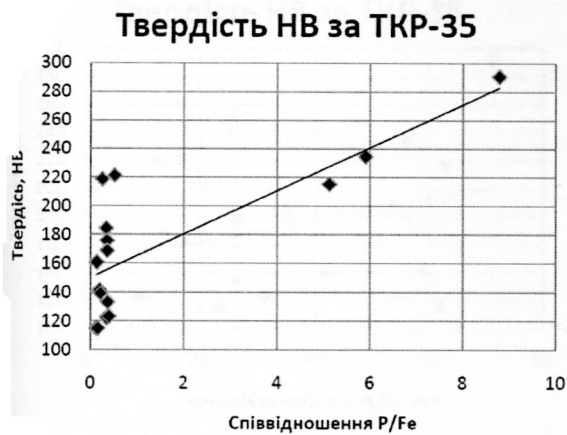
Таблиця 3.4 – Результати дослідження мікроструктури і вимірювання фізичних і механічних структурно-чутливих параметрів сталевих зразків

№ зр.	Марка сталі	$\bar{D}$ , мкм	P/Fe	Твердість, НВ		Hc, А/см	I, ум.од.	T, ум.од.	$\rho$ , нОм*М
				ТКР-35	ТД-32				
1	Сталь 10пс	58,89	0,2	141,5	135	2,26	1785,8	6,08	178
2	Сталь 10	62,24	0,16	114,9	114,3	1,53	1950,5	5,82	198
3	Сталь 09Г2С	9,62	0,35	122,2	116	1,82	1997,2	5,95	267
4	Ст.3пс	26,6	0,36	175,6	136,6	3,25	1853,5	4,557	329
5	Сталь 10 (Е)	31,54	0,4	123,2	138,3	1,43	2156,6	6,738	165
6	Сталь 60Г	71,01	8,79	290,7	249,6	8,55	1532,4	5,369	350
7	Ст.3пс (Е)	26,54	0,37	133,1	134,6	3,01	1629	5,87	141
8	ВСт.4пс	42,08	0,22	139,2	126,3	1,99	1975,3	5,849	172
9	Сталь 10 (Е)	16,89	0,14	160,6	134	3,19	1839,8	4,929	272
10	Сталь 10Г2С1 (Е)	35,12	0,34	184,2	149	3,92	1996,5	4,749	370
11	ВСт.4пс (Е)	23,59	0,13	114,8	118,6	2,24	1846,5	5,207	264
12	Сталь 09Г2С (Е)	13,6	0,36	168,7	151	3,8	1729,6	5,034	224
13	Сталь 40Г	62,61	5,13	215,2	187	5,61	1561,8	5,764	380
14	Сталь 45	56,14	5,91	234,8	198,3	5,3	1573,7	5,571	315
15	Сталь 09Г2 (Е)	16,67	0,52	127,8	188,3	2,89	1684,2	6,223	198
16	Сталь 09Г2	12,79	0,26	196,7	203	3,14	1895,5	5,709	385

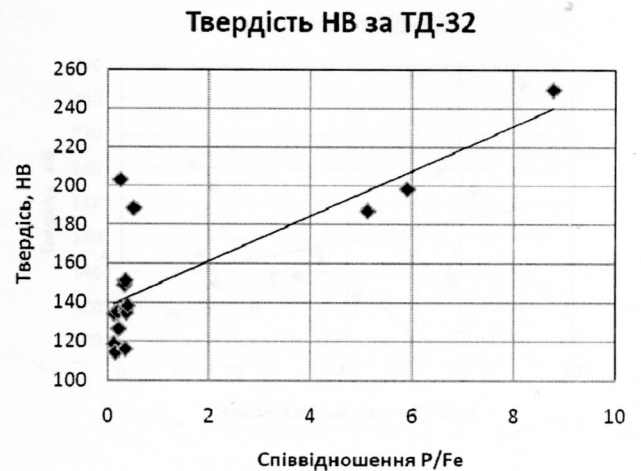
Примітка. (Е) – сталь конструкції, що була в експлуатації.

### 3.5 Аналіз та опрацювання результатів досліджень

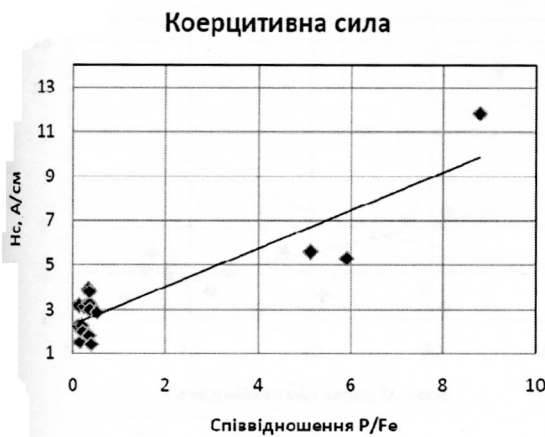
Наступним етапом стало проведення графічного та кореляційного аналізу з метою встановлення характеру залежності між параметрами мікроструктури і виміряними фізичними параметрами. На рисунках 3.11, 3.12 зображено графіки залежностей границі плинності від твердості та питомого електричного опору відповідно. Також на рисунках зображено криві апроксимації.



а)



б)



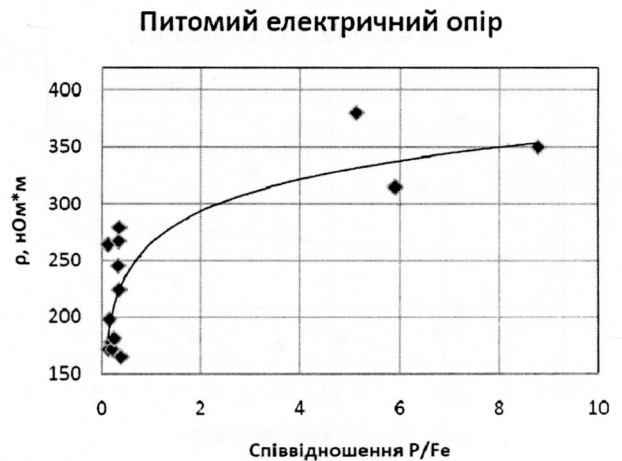
в)



г)

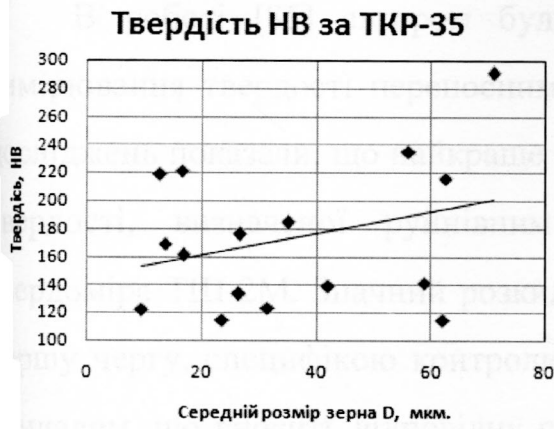


д)

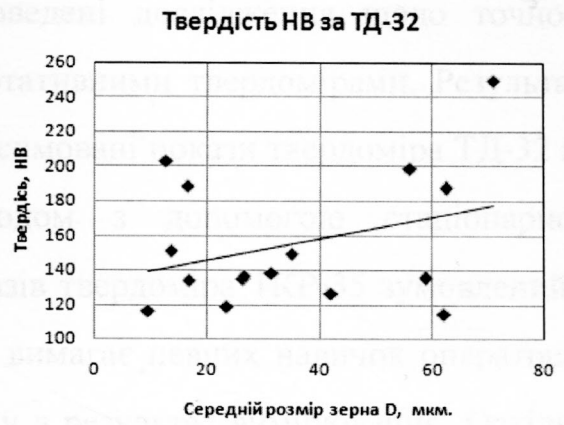


е)

Рисунок 3.11 – Залежності фізичних і механічних параметрів від співвідношення P/Fe (перліт/ферит) досліджуваних сталей



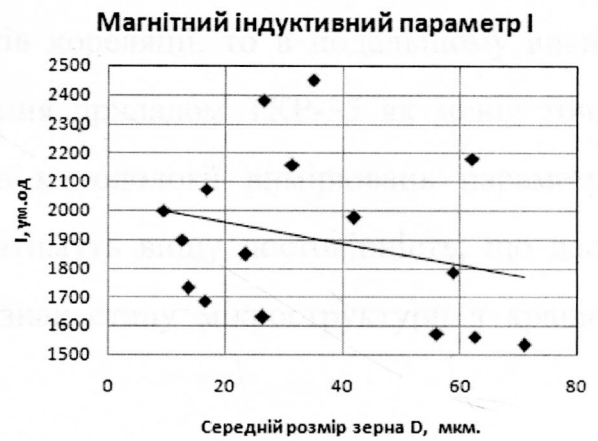
а)



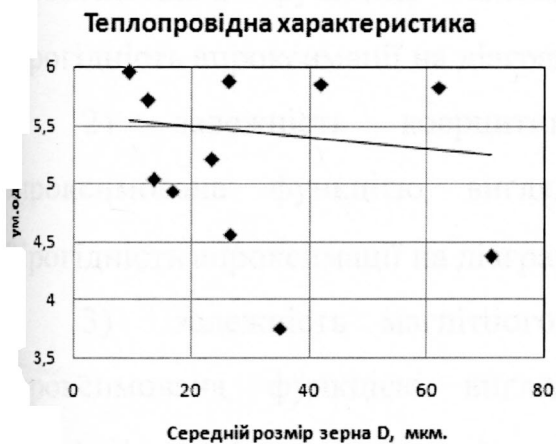
б)



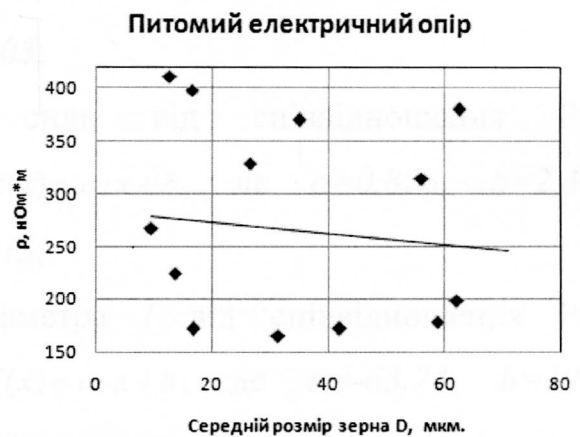
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.12 – Залежностей фізичних і механічних параметрів від середнього розміру зерна досліджуваних сталей

В роботі [85] автором були проведені дослідження щодо точності вимірювання твердості переносними портативними твердомірами. Результати досліджень показали, що найкраще апроксимовані покази твердоміра ТД-32 від твердості, визначеної руйнівним методом з допомогою стаціонарного твердоміра ТШ-2М. Значний розкид показів твердоміра ТКР-35 зумовлений, в першу чергу, специфікою контролю, яка вимагає певних навичок оператора з приладом, що вносить відповідну похибку в результат вимірювання. Оскільки результати вимірювань твердості в даній роботі, одержані обома приладами, мають несуттєві відмінності коефіцієнтів кореляції, то в подальшому аналізі бралися до уваги результати вимірювання приладом ТКР-35 як менш точні. При використанні твердоміра ТД-32 в методології вимірювань параметрів мікроструктури одержані результати матимуть вищу достовірність, що дасть змогу одержати значення кількісних ознак стану мікроструктури з кращою якістю.

Параметри апроксимації одержаних залежностей такі:

1) залежність твердості за ТКР-35 від співвідношення P/Fe апроксимована функцією вигляду  $f(x) = a \cdot x + b$ , де  $a = 15,12$ ,  $b = 150,1$ . Вірогідність апроксимації на діаграмі 0,603;

2) залежність коерцитивної сили від співвідношення P/Fe апроксимована функцією вигляду  $f(x) = a \cdot x + b$ , де  $a = 0,858$ ,  $b = 2,311$ . Вірогідність апроксимації на діаграмі 0,815;

3) залежність магнітного параметра  $I$  від співвідношення P/Fe апроксимована функцією вигляду  $f(x) = a \cdot x + b$ , де  $a = -63,74$ ,  $b = 1997$ . Вірогідність апроксимації на діаграмі 0,343;

4) залежність теплопровідної характеристики  $T$  від співвідношення r/Fe апроксимована функцією вигляду  $f(x) = a \cdot x + b$ , де  $a = -0,132$ ,  $b = 5,553$ . Вірогідність апроксимації на діаграмі 0,133;

5) залежність питомого електричного опору від співвідношення P/Fe апроксимована функцією вигляду  $f(x) = a \cdot \ln(x) + b$ , де  $a=39,62$ ,  $b=298,5$ . Вірогідність апроксимації на діаграмі 0,208;

6) залежність твердості за ТКР-35 від середнього розміру зерна  $\bar{D}$  апроксимована функцією вигляду  $f(x) = a \cdot x + b$ , де  $a=0,78$ ,  $b=144,8$ . Вірогідність апроксимації на діаграмі 0,098;

7) залежність коерцитивної сили від середнього розміру зерна  $\bar{D}$  апроксимована функцією вигляду  $f(x) = a \cdot x + b$ , де  $a=0,061$ ,  $b=1,419$ . Вірогідність апроксимації на діаграмі 0,252;

8) залежність магнітного параметра  $I$  від середнього розміру зерна  $\bar{D}$  апроксимована функцією вигляду  $f(x) = a \cdot x + b$ , де  $a=-3,726$ ,  $b=2034$ . Вірогідність апроксимації на діаграмі 0,071;

9) залежність теплопровідної характеристики  $T$  від середнього розміру зерна  $\bar{D}$  апроксимована функцією вигляду  $f(x) = a \cdot x + b$ , де  $a=-0,004$ ,  $b=5,584$ . Вірогідність апроксимації на діаграмі 0,012;

10) залежність питомого електричного опору від середнього розміру зерна  $\bar{D}$  апроксимована функцією вигляду  $f(x) = a \cdot x + b$ , де  $a=-0,527$ ,  $b=283,4$ . Вірогідність апроксимації на діаграмі 0,010.

Види функцій апроксимації зображених вище залежностей, окрім випадку залежності твердості та коерцитивної сили співвідношення P/Fe, носять нелінійний характер [79].

Наступним етапом було проведення попарного аналізу результатів спостережень параметрів мікроструктури  $M_q$  та інформативних фізичних параметрів  $F_j$  на наявність між ними кореляційної залежності згідно формули [80]

$$R = \frac{\frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n M_{qi} \cdot F_{ji} - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n M_{qi} \right) \left( \sum_{i=1}^n F_{ji} \right) \right]}{\sigma_{M_q} \cdot \sigma_{F_j}} \quad (3.1)$$

де  $R$  – коефіцієнт кореляції;  $M_q$  - відповідний параметр мікроструктури;  $F_j$  - відповідний фізичний параметр;  $\sigma_{M_q}$  та  $\sigma_{F_j}$  - стандартні відхилення відповідних величин;  $n$  – кількість спостережень.

Таблиця значень коефіцієнтів кореляцій між вимірними параметрами мікроструктури і фізичними параметрами наведена в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Коефіцієнти кореляцій між вимірними параметрами мікроструктури і фізико-механічними параметрами досліджуваних сталей

	НВ за ТКР-35	НВ за ТД-32	$H_s$ , А/см	$I$ , ум.од.	$T$ , ум.од.	$\rho$ , нОм*м
$P/Fe$	0,7771	0,7934	0,9033	-0,5782	-0,2311	0,3999
$\bar{D}$ , мкм	0,3135	0,3325	0,5018	-0,1917	-0,0504	-0,0313

Як показують результати досліджень, спостерігається хороша кореляція між співвідношенням фазових складових перліт/ферит і твердістю, коерцитивною силою та умовним магнітним індуктивним параметром. Знак мінус в останньому випадку говорить про обернену залежність, що підтверджує теоретичні пояснення щодо залежностей між цими параметрами. Питомий електричний опір та теплопровідна характеристики мають незначну кореляцію з фазо-структурним параметром через невисоку чутливість методів до структурних змін на мікрорівні і носять виражений інтегральний характер. Слід відмітити нелінійний характер зв'язку між параметрами структури і фізичними параметрами, тому доцільно для аналізу мікроструктурних змін використовувати їх в комплексі. Оскільки теплопровідна характеристика  $T$  та питомий електричний опір  $\rho$  погано корелюють з параметрами мікроструктури, то в подальшій обробці результатів контролю вони до уваги не брались.

Аналізуючи одержані результати досліджень можна стверджувати, що в польових умовах можна використовувати динамічний твердомір типу ТД-32, оскільки його покази в цілому співпадають з фактичними значеннями твердості.

Метою подальших досліджень було визначення оптимальної комбінації вимірюваних параметрів (твердість, коерцитивна сила та магнітний параметр) із усіх визначених, які найкраще корелюють в комплексі з досліджуваними параметрами мікроструктури, з використанням кореляційно-регресійного аналізу

Кореляційно-регресійний аналіз є методом оброблення статистичних даних, з допомогою якого вимірюється тісність зв'язку між двома або більше змінними. Кореляційний аналіз використовується для визначення необхідності включення тих чи інших чинників до рівнянь регресії, а також оцінюють отримане рівняння регресії на відповідність виявленим зв'язкам.

На основі вимірних інформативних параметрів розраховують таблицю коефіцієнтів кореляції, а за ними визначають наявність та ступінь зв'язку між елементами відібраної множини інформативних параметрів та цільовим параметром. Додатні значення коефіцієнтів кореляції вказують на прямо пропорційний зв'язок, тоді як від'ємні – на обернений.

Як правило, значення, що перебувають в межах від 0,4 до 0,8 вказують не на відсутність зв'язку між досліджуваними характеристиками, а на його нелінійний характер.

Таким чином, результати кореляційного аналізу можуть допомогти відкинути відразу інформативні параметри, що ніяким чином не пов'язані з цільовим та вказати на можливий нелінійний характер залежності.

При формуванні комплексних наборів даних слід керуватись правилом перебору всіх можливих варіантів, тобто в разі наявності 3-ох інформативних параметрів слід сформувати 4 набори даних (3 набори з 2-ох параметрів та 1 набір з 3-ох параметрів), у випадку 4-ох параметрів – 11 наборів (6 наборів з 2-ох параметрів, 4 набори з 3-ох параметрів та 1 набір з 4-ох параметрів) і так далі.

На даному етапі досліджень для їх найбільш якісного виконання рекомендується використовувати пакет прикладного програмного забезпечення

для обчислень. В даному випадку був використаний програмний пакет OriginPro SR1 b76.

Враховуючи рекомендації, наведені вище, були одержані рівняння лінійної регресії [87] за значеннями попарних груп вхідних параметрів. Коефіцієнти лінійної регресії знаходились за методом найменших квадратів [87], рівняння лінійних регресій наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Рівняння лінійних регресій між вимірними параметрами досліджуваних сталей

Функція залежності	Рівняння лінійної регресії	Коефіцієнти регресії	Квадрат кореляції між групою аргументів та функцією
$P/Fe = f(Hc, HB, I)$	$Y = A0 + A1 \cdot Hc + A2 \cdot HB + A3 \cdot I$	$A0 = 1,63347$ $A1 = 0,82631$ $A2 = 0,00151$ $A3 = 0,00177$	0,9193
$d_{ум} = f(Hc, HB, I)$	$Y = A0 + A1 \cdot Hc + A2 \cdot HB + A3 \cdot I$	$A0 = 46,0722$ $A1 = 6,52898$ $A2 = -0,15238$ $A3 = -0,00409$	0,5432
$P/Fe = f(Hc, HB)$	$Y = A0 + A1 \cdot Hc + A2 \cdot HB$	$A0 = -2,27653$ $A1 = 0,8958$ $A2 = 0,00318$	0,90382
$P/Fe = f(Hc, I)$	$Y = A0 + A1 \cdot Hc + A3 \cdot I$	$A0 = 1,83758$ $A1 = 0,85134$ $A3 = -0,00179$	0,91916

Продовження таблиці 3.6

$P/Fe = f(HB, I)$	$Y = A_0 + A_2 \cdot HB + A_3 \cdot I$	$A_0 = 0,89606$ $A_2 = 0,03306$ $A_3 = -0,00269$	0,8195
$d_{ум} = f(Hc, HB)$	$Y = A_0 + A_1 \cdot Hc + A_2 \cdot HB$	$A_0 = 37,04222$ $A_1 = 6,68945$ $A_2 = -0,14853$	0,54093
$d_{ум} = f(Hc, I)$	$Y = A_0 + A_1 \cdot Hc + A_3 \cdot I$	$A_0 = 25,48558$ $A_1 = 4,00385$ $A_3 = -0,00234$	0,50316
$d_{ум} = f(HB, I)$	$Y = A_0 + A_2 \cdot HB + A_3 \cdot I$	$A_0 = 40,2456$ $A_2 = 0,09691$ $A_3 = -0,01134$	0,34328

Як бачимо з таблиці 3.6, квадрат кореляції між групою аргументів та функцією (коефіцієнт детермінації – наближення цього значення до одиниці свідчить про краще моделювання) має найвищі значення при застосуванні у якості вимірюваних параметрів структурночутливих магнітних властивостей (коерцитивної сили та індуктивного параметру), що черговий раз підтверджує правильність вибору вказаних магнітних параметрів контролю. При оцінюванні середнього діаметру зерна більш достовірним буде результат при урахуванні трьох фізичних параметрів контролю (коерцитивної сили, індуктивного параметру та твердості), при визначенні співвідношення фаз достовірним результат буде при комплексному врахуванні як трьох параметрів (коерцитивної сили, індуктивного параметру та твердості), так і комбінації значень коерцитивної сили та індуктивного параметру  $I$ .

### 3.6 Отримання аналітичних залежностей між параметрами контролю

Оскільки кореляційний аналіз дає можливість встановити тільки наявність чи відсутність залежності між досліджуваними параметрами, а не

оцінити її характер, метою подальших досліджень було встановлення, власне, характеру зв'язку між параметрами мікроструктури і фізичними властивостями досліджуваної групи сталей. Для вирішення цієї задачі було використано алгоритми штучних нейронних мереж [88].

Штучні нейронні мережі – це розділ штучного інтелекту, в якому для оброблення вхідної інформації використовують процеси і явища, аналогічні тим, які відбуваються в нейронах живих істот. Найважливіша особливість мережі, що вказує на можливості її широкого застосування та високий потенціал, ґрунтується на паралельному обробленні інформації всіма розгалуженнями. Велика кількість міжнейронних взаємозв'язків дозволяє значно пришвидшити процес оброблення інформації. Інша не менш важлива особливість ШНМ полягає у здатності навчатись та узагальнювати накопичені дані [89]. Нейронна мережа володіє властивостями, які притаманні штучному інтелекту. Нейрони штучної мережі пов'язані між собою синаптичними з'єднаннями. У процесі роботи ШНМ перетворює вхідну інформацію, в результаті чого змінюється внутрішній стан мережі і відбувається формування вихідних параметрів.

Для класифікації і розпізнавання образів мережа накопичує в процесі навчання знання про основні характеристики цих образів, таких як геометричне відображення структури образу, розподіл головних компонентів або інших характеристик. При узагальненні акцентується увага на відмінностях образів один від одного, які складають основу для вибору класифікаційних рішень.

Починаючи із 1980-их років з розвитком комп'ютерної техніки з'явилися можливості для програмної реалізації алгоритмів штучних нейронних мереж, розроблених набагато раніше. Постійно зростаюча комп'ютеризація методів та засобів неруйнівного контролю робить їх придатними до удосконалень, що мають нейромережеве походження.

Необхідно зазначити, що в наш час штучні нейронні мережі починають завойовувати увагу все більшої кількості спеціалістів внаслідок того, що

завдяки сучасним електронним компонентам (цифрові сигнальні процесори, програмно-логічні матриці) їх реалізація є дуже простою і ефективною [90].

Перед початком роботи більшість штучних нейронних мереж потребують тренування, зміст якого полягає у підборі параметрів мережі, за яких вона найкращим чином вирішує поставлені задачі. Для вирішення задачі тренування ШНМ існує досить багато алгоритмів [94].

Для розв'язання прикладних задач за допомогою нейронних мереж необхідно зібрати достатній і репрезентативний об'єм даних для того, щоб навчити нейронну мережу вирішувати такі задачі. Навчальний набір даних - це набір спостережень, які містять ознаки досліджуваного об'єкта [92].

Процес формування нейронної мережі складається із таких етапів:

- вибору початкової конфігурації мережі, наприклад, у вигляді одного шару із кількістю нейронів, рівною половині кількості входів і виходів;
- моделювання і навчання мережі із оцінюванням контрольної похибки і використання додаткових нейронів або проміжних шарів;
- виявлення ефекту перенавчання і коректування конфігурації мережі [93].

Шляхом аналізу способів побудови структури нейромереж, алгоритмів роботи та типів ШНМ та проведених теоретичних досліджень було обрано архітектуру нейромережі, яка найкращим чином вирішувала поставлені задачі.

Для реалізації описаної послідовності операції з тренування штучних нейронних мереж рекомендується використовувати спеціалізований програмний додаток *Neural Network Toolbox* в середовищі *MatlabR14* [94].

Нейронна мережа заданої будови тренувалась для вирішення задачі апроксимації окремо середнього розміру зерна та співвідношення фазових складових від двох або трьох вимірюваних параметрів, описаних вище. Нейромережевий підхід було використано, зокрема, для отримання аналітичних залежностей між комплексом фізичних вимірних параметрів та окремо середнім розміром зерна і відношенням фазових складових.

Спочатку було встановлено аналітичні залежності середнього розміру зерна та відношення фазових складових за трьома фізичними параметрами ( $HB$ ,  $HC$ ,  $I$ ) та оцінено для кожного випадку точність визначення на тестових зразках, відомості про які не використовувались для навчання (таблиця 3.7).

Таблиця 3.7 – Параметри тестових зразків, що не використовувались у навчанні нейромережі

№ зр.	$HB$	$HC$	$I$	$\bar{D}$	$P/Fe$
<b>1</b>	142	2,17	1795	10,67	0,201
<b>4</b>	177	3,2	2333	10,69	0,36
<b>8</b>	207	5,77	1585	113,5	5,13
<b>16</b>	214	3,16	1931	8,02	0,26

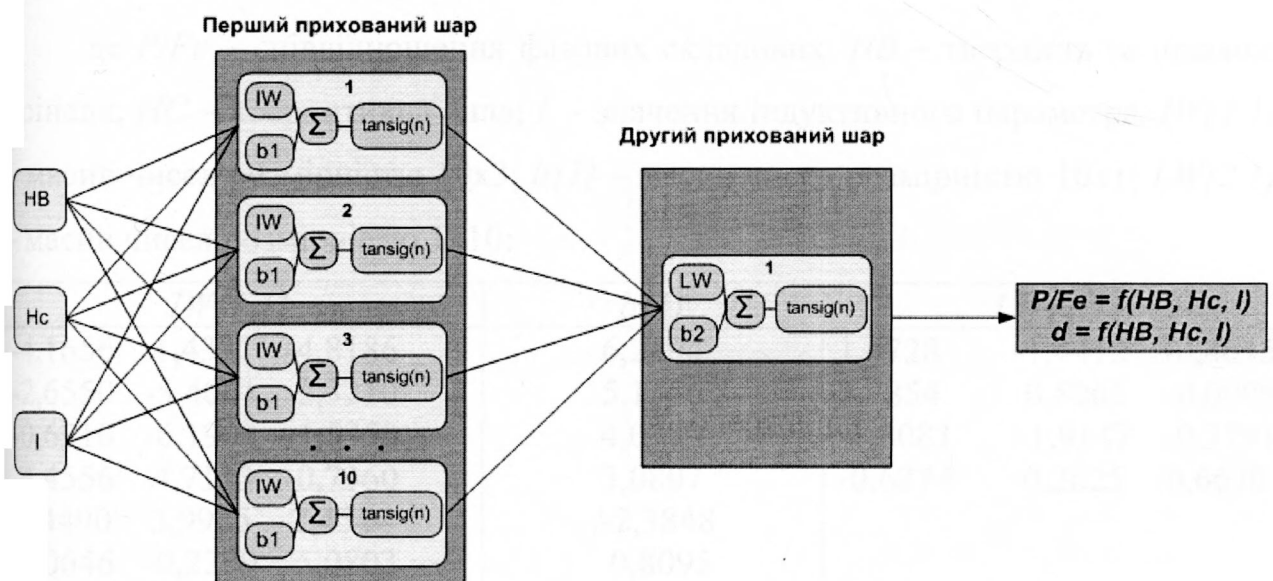
Аналітична залежність для визначення середнього розміру за трьома параметрами має вигляд

$$\bar{D} = \frac{290}{1 + e^{-2 \left( \sum_{n=1}^{10} (LW\{2,1\} \cdot \frac{2}{-2 \sum_{n=1}^{10} (IW\{1,1\} \cdot \left[ \left( \frac{HB-100}{200} \right) \cdot \left( \frac{HC-1}{12} \right) \cdot \left( \frac{I-1500}{100} \right) \right] + b\{1\}) \right) - 1}} \right)} - 163,457, \quad (3.2)$$

де  $\bar{D}$  – середній розмір зерна,  $HB$  – твердість за шкалою Брінеля;  $HC$  – берцтивна сила;  $I$  - значення індуктивного параметра.  $IW\{1,1\}$  – масив чисел розмірністю 10x3;  $b\{1\}$  – масив чисел розмірністю 10x1;  $LW\{2,1\}$  – масив чисел розмірністю 1x10:

$IW\{1,1\}$			$b\{1\}$	$LW\{2,1\}$		
0,1681	-6,5510	5,6500	-4,8592	4,5344	-0,2222	-3,3343
-4,2832	-3,8053	-0,748	5,3385	1,4139	1,0534	-3,3327
1,5062	-2,9915	6,3017	2,8182	-2,2913	-0,8510	0,2802
1,4559	3,1913	-4,4569	-3,7373	1,1055	1,0171	0,9228
2,9118	-3,4294	-,0005	-2,2172			
-2,8808	5,0278	5,3532	0,4952			
-1,7655	-6,1334	-0,236	-0,2325			
6,2187	1,6935	-0,8566	2,1239			
-3,9545	0,0416	4,6463	-2,9016			
5,1740	4,6353	1,8172	2,0171			
5,1871	2,3104	1,5123	5,8647			
3,4832	3,8825	4,0790	6,2740			

Структура нейронної мережі для одержання аналітичної залежності середнього розміру зерна від трьох фізичних параметрів ( $HB$ ,  $H_c$ ,  $I$ ) зображена на рисунку 3.13.



$IW\{1,1\}$  – вагові коефіцієнти першого шару нейронів – матриця  $10 \times 3$ ;  $b\{1\}$  – затримки першого шару – матриця  $10 \times 1$ ;  $LW\{2,1\}$  – вагові коефіцієнти другого шару – матриця  $1 \times 10$ ;  $b\{2\}$  – затримки другого шару – матриця  $1 \times 1$ .

Рисунок 3.13 – Архітектура нейромережі для визначення параметрів мікроструктури за трьома вхідними параметрами  $HB$ ,  $H_c$ ,  $I$

Результати перевірки достовірності одержаної аналітичної залежності на зразках, що не брали участь в тестуванні, відображені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Результати перевірки нейромережі

Розраховані значення $\bar{D}$ , мкм	7,78	11,12	95,88	8,57
Дійсні значення $\bar{D}$ , мкм	10,67	10,69	113,50	8,02

Середня похибка результатів розрахунку, зведена до діапазону вимірювання, складає 3,71%.

Аналitична залежність для визначення відношення фазових складових мікроструктури  $P/Fe$  за трьома параметрами ( $HB$ ,  $HC$ ,  $I$ ) має вигляд

$$P/Fe = \frac{20}{1 + e^{-2 \left( \sum_{n=1}^{10} LW\{2,1\} \left( \frac{2^{-2 \sum_{n=1}^{10} IW\{1,1\} \left[ \left( \frac{HB-100}{200} \right); \left( \frac{HC-1}{12} \right); \left( \frac{I-1500}{100} \right) \right] + b\{1\} \right) - 1 \right)}}} - 13,069, \quad (3.3)$$

де  $P/Fe$  – співвідношення фазових складових,  $HB$  – твердість за шкалою Брінеля;  $HC$  – коерцитивна сила;  $I$  - значення індуктивного параметра.  $IW\{1,1\}$  – масив чисел розмірністю  $10 \times 3$ ;  $b\{1\}$  – масив чисел розмірністю  $10 \times 1$ ;  $LW\{2,1\}$  – масив чисел розмірністю  $1 \times 10$ :

$IW\{1,1\}$			$b\{1\}$	$LW\{2,1\}$		
-4,1656	1,4331	-4,8186	6,2494	1,4728	-1,4412	-0,4615
-2,6550	-5,4061	2,3210	5,1356	2,7854	0,8065	-0,0005
-0,6310	-6,1904	1,5350	4,0759	-1,8083	-1,9147	-0,3791
-4,4556	4,7123	-0,7360	3,0807	-0,6274	-0,2625	-0,6670
4,4490	3,9985	2,4544	-2,3848			
-5,0646	-0,2209	5,0803	0,8095			
-1,8824	-4,8870	3,4906	-0,4296			
-5,2400	3,0727	-2,7851	-0,7284			
-2,8943	-2,0863	4,2344	-3,5397			
-5,7949	-3,5452	0,2130	-1,7552			
0,9848	6,7682	-1,0718	4,1977			
2,3769	-4,4281	-3,9804	6,3979			

Структура нейронної мережі для одержання аналітичної залежності відношення фазових складових мікроструктури  $P/Fe$  від обраних фізичних параметрів зображена на рисунку 3.13.

Результати перевірки достовірності одержаної аналітичної залежності на разках, що не брали участь в тестуванні, відображені в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати перевірки нейромережі

Розраховані значення P/Fe	0,23	0,36	4,53	0,32
Дійсні значення P/Fe	0,20	0,36	5,13	0,26

Середня похибка результатів розрахунку, зведена до діапазону вимірювання, складає 2,31%.

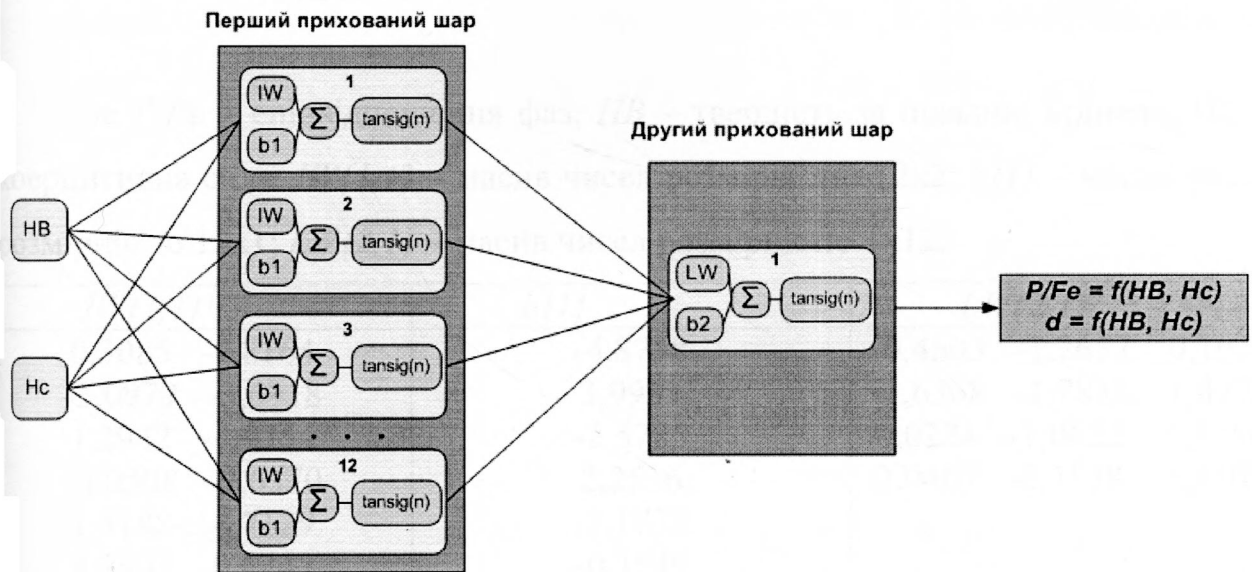
Аналітична залежність для визначення середнього розміру за двома параметрами ( $HB$ ,  $HC$ ), згідно результатів кореляційного аналізу, має вигляд

$$\bar{D} = \frac{290}{1 + e^{-2 \left( \sum_{n=1}^{12} (LW\{2,1\}) \left[ \frac{2}{-2 \sum_{n=1}^{12} (IW\{1,1\}) \left[ \left( \frac{HB-100}{200} \right); \left( \frac{HC-1}{12} \right) \right] + b\{1\} \right] - 1 \right)}} - 150,034, \quad (3.4)$$

де  $\bar{D}$  – середній розмір зерна,  $HB$  – твердість за шкалою Брінеля;  $HC$  – коерцитивна сила;  $IW\{1,1\}$  – масив чисел розмірністю 12x2;  $b\{1\}$  – масив чисел розмірністю 12x1;  $LW\{2,1\}$  – масив чисел розмірністю 1x12:

$IW\{1,1\}$	$b\{1\}$	$LW\{2,1\}$
1,3872 -5,0116	-4,3725	0,9453 0,5046 -0,6039
4,0241 -2,6422	-4,0479	0,9003 -0,2152 -0,5486
-1,0445 4,3200	3,5667	0,7526 1,7563 -0,1680
-3,4963 3,3885	2,2581	0,4709 -0,3763 0,5127
-4,3293 2,6011	0,5555	
2,7531 -4,1623	0,2131	
3,2753 -3,7151	0,6339	
2,3892 4,3847	1,1185	
-2,3143 4,2622	-2,2069	
4,3073 -2,3180	3,1574	
0,3587 -4,8364	3,9677	
4,6108 -1,7246	4,7751	

Структура нейронної мережі для одержання аналітичної залежності середнього розміру зерна від обраних фізичних параметрів ( $HB$ ,  $Hc$ ) зображена на рисунку 3.14.



$IW\{1,1\}$  – вагові коефіцієнти першого шару нейронів – матриця  $12 \times 2$ ;  $b\{1\}$  – затримки першого шару – матриця  $12 \times 1$ ;  $LW\{2,1\}$  – вагові коефіцієнти другого шару – матриця  $1 \times 12$ ;  $b\{2\}$  – затримки другого шару – матриця  $1 \times 1$ .

Рисунок 3.14 – Архітектура нейромережі для визначення параметрів мікроструктури за двома вхідними параметрами  $HB$  та  $Hc$

Результати перевірки достовірності одержаної аналітичної залежності на зразках, що не брали участь в тестуванні, відображені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Результати перевірки нейромережі

Розраховані значення $\bar{D}$ , мкм	12,05	10,73	109,36	9,24
Дійсні значення $\bar{D}$ , мкм	10,67	10,69	113,51	8,02

Середня похибка результатів розрахунку, зведена до діапазону вимірювання, складає 1,33 %.

Аналітична залежність для визначення відношення фазових складових за двома параметрами ( $HB$ ,  $Hc$ ) має вигляд

$$P/Fe = \frac{20}{1 + e^{-2 \left( \sum_{n=1}^{12} (LW\{2,1\}) \left[ \frac{2}{-2 \sum_{n=1}^{12} (IW\{1,1\}) \left[ \left( \frac{HB-100}{200} \right); \left( \frac{HC-1}{12} \right) \right] + b\{1\} \right] - 1 \right)}} + 0,472, \quad (3.5)$$

де  $P/Fe$  – співвідношення фаз,  $HB$  – твердість за шкалою Брінеля;  $HC$  – коерцитивна сила.  $IW\{1,1\}$  – масив чисел розмірністю  $12 \times 2$ ;  $b\{1\}$  – масив чисел розмірністю  $12 \times 1$ ;  $LW\{2,1\}$  – масив чисел розмірністю  $1 \times 12$ :

$IW\{1,1\}$	$b\{1\}$	$LW\{2,1\}$
0,3085 -4,8164	-4,8758	-0,4603 -1,2657 0,1073
-3,0979 -3,6918	3,9931	-1,6368 -1,7836 1,4772
1,2942 -4,9754	-2,5785	0,0224 -1,0622 -1,5756
-4,0508 -2,6370	2,2516	2,9467 -0,7578 -2,5103
1,4188 -4,7129	-1,1772	
4,7995 0,6247	-0,3549	
3,0464 3,7631	0,5604	
3,9771 -1,8433	1,9405	
4,8794 -1,7466	1,2199	
2,9504 3,3820	3,2488	
-4,4311 -1,3771	-4,1897	
-4,1523 -2,9599	-4,5611	

Структура нейронної мережі для одержання аналітичної залежності середнього розміру зерна від обраних фізичних параметрів зображена на рисунку 3.14.

Результати перевірки достовірності одержаної аналітичної залежності на пробах, що не брали участь в тестуванні, відображені в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Результати перевірки нейромережі

Розраховані значення $P/Fe$	0,133	0,134	4,672	0,286
Дійсні значення $P/Fe$	0,201	0,360	5,130	0,260

Середня похибка результатів розрахунку, зведена до діапазону вимірювання, складає 2,24%.

Одержані результати апроксимації показують, що похибка визначення відношення фазових складових мікроструктури за твердістю, коерцитивною силою і індуктивним магнітним параметром  $I$  має менше значення, ніж при визначенні цього відношення за твердістю та коерцитивною силою і складає відповідно 2,24% та 2,31%. В той час, навпаки, визначення середнього розміру зерна є більш точним за значеннями двох параметрів – твердості і коерцитивної сили, і складає 1,33% на відміну від значення похибки 3,71% за значеннями трьох вхідних параметрів.

### Висновки до розділу 3

1 Проведені експериментальні лабораторні вимірювання запропонованих фізичних структурночутливих параметрів на сталених зразках визначених марок з використанням засобів контролю, що ґрунтуються на використанні різних фізичних принципів. Параметри мікроструктури одержані шляхом металографічних досліджень з використанням спеціалізованого обладнання.

2 Аналіз мікрофотознімків проводився з використанням цифрових методів за спеціальною методикою, що реалізувалися доступним некомерційним і неспеціалізованим програмним забезпеченням ImageJ для обробки зображень.

3 Проведений графо-аналітичний та кореляційний аналіз для визначення якості кореляційних зв'язків кожного окремого з вимірюваних фізичних параметрів з окремими параметрами мікроструктури. За результатами кореляційного аналізу вибраний оптимальний набір інформативних параметрів контролю.

4 Проведений регресійно-кореляційний аналіз для визначення оптимальної комбінації вимірюваних параметрів (твердість, коерцитивна сила та магнітний параметр) із усіх визначених в ході лабораторних досліджень, які найкраще корелюють в комплексі з досліджуваними параметрами мікроструктури. Кореляційно-регресійний дав можливість виміряти тісність

зв'язку між двома або більше змінними і визначити необхідності включення тих чи інших чинників до рівнянь регресії, а також оцінити отримане рівняння регресії на відповідність виявленим зв'язкам.

5 З використанням алгоритму штучних нейронних мереж були отримані аналітичні залежності кожного окремого параметру мікроструктури від різних комбінацій комплектів вхідних інформативних фізичних параметрів.

6 Оцінена точність аналітичного визначення параметрів мікроструктури на зразках матеріалу, що не брали участь в тестуванні нейронної мережі. Одержані значення найменших похибок складають 2,24% при визначенні співвідношення фазових складових P/Fe за трьома фізичними параметрами: твердістю, коерцитивною силою та магнітним параметром, та 1,33% при визначенні середнього діаметру зерна  $\bar{D}$  за двома фізичними параметрами: твердістю та коерцитивною силою.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ЯКІСНИХ ЗМІН СТАЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ НАФТОГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА СТАНОМ ЇХ МІКРОСТРУКТУРИ

Для проведення промислової апробації результатів теоретичних та експериментальних досліджень необхідно було розробити метод для оцінювання якості металу елементів нафтогазового обладнання за станом мікроструктури на основі визначення її кількісних параметрів за значеннями дійсних їх фізичних характеристик та проект нормативного документу (методики) проведення контролю в промислових умовах.

Контроль якісних характеристик матеріалу, визначених в розділі 3 сталевих конструкцій, в процесі їх експлуатації здебільшого необхідно здійснювати в польових умовах. Нова продукція, яка поставляється і вимагає проведення вхідного контролю їх матеріалів, може контролюватися в умовах цеху.

Відомо, що достовірність контролю якості матеріалів характеризується стійкою відповідністю його результатів до реального значення оцінюваної величини [95]. Достовірність даних контролю залежить не тільки від метрологічних характеристик апаратури, але й від використаних методик. Таким чином, правильно розроблена методологія є запорукою одержання достовірних результатів за допомогою розробленого методу.

На сьогоднішній день існує небагато нормативних документів, які регламентують порядок визначення механічних характеристик та якості сталей в цілому [96 – 99]. Зрозуміло, що руйнівні методики [100 - 103] застосувати на діючому об'єкті неможливо, а у випадках коли вирізка частини тіла об'єкту можлива, то необхідно затратити чимало часу на проведення таких випробувань.

Сучасні методики для діагностування технічного стану обладнання нафтогазового комплексу регламентують визначати механічні характеристики

сталевих конструкцій здебільшого через вимірювання таких інформативних параметрів, як твердість та магнітних характеристик, зокрема петлі гістерезису.

Так, нормативною базою магнітного контролю механічних характеристик конструкцій із феромагнітних сталей є Міждержавний стандарт ГОСТ 30415-96 [104]. Даний стандарт поширюється на сортовий, листовий, фасонний прокат, багатошарові листи із вуглецевих, легованих та електротехнічних марок сталей і встановлює неруйнівний метод контролю механічних та технологічних властивостей, а також опосередкований контроль мікроструктури.

Згідно положень даного стандарту магнітний метод контролю застосовується для визначення: фізичної та умовної границі плинності, відносного видовження після розриву, відносного звуження поперечного січення після розриву, відносного рівномірного видовження, коефіцієнта пластичної анізотропії, показників деформаційного зміцнення і нерівномірної пластичної деформації, фактичного опору розриву, твердості, величини зерна, чутливості сталі до механічного старіння, ударного згину, частки в'язкої складової в зламі, кута згину чи оцінки граничної пластичності при згині, глибини знеуглецьованого шару, відносної деформації.

В стандарті регламентовано, що при неруйнівному контролі показників якості, що оцінюються за ознакою «задовільно-незадовільно», встановлюється допустима межа вимірюваної магнітної характеристики, що гарантує встановлення норми з прийнятою в стандарті ймовірністю.

Проте чітких рекомендацій щодо порядку проведення контролю в даному стандарті не наведено, а вказано тільки на необхідність встановлення кореляційних залежностей між досліджуваними механічними і магнітними характеристиками індивідуально на кожному підприємстві.

В інструкції ДСТУ 4046-2001 [96], наприклад, яка встановлює вимоги по проведенню технічної діагностики обладнання технологічних нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв, дослідження мікроструктури регламентують проводити у таких випадках:

– якщо за умовами експлуатації можлива зміна структури;

- у разі незадовільних результатів вимірювань твердості;
- у разі визначення причин виникнення корозійних руйнувань (здуття, опуклин, тріщин) та інших пошкоджень, які впливають на працездатність об'єкта;
- у разі зміни режимів експлуатації, в результаті чого можливі зміни мікроструктури;
- за вимогами нормативних документів.

Мікроструктурні дослідження повинні передбачати:

- визначення забрудненості сталей та сплавів неметалевими включеннями за ГОСТ 1778 [105];
- визначення величини зерна, схильності зерен до росту та кінетики їх росту;
- кількісний металографічний аналіз структурних складових сталі (перліту, мартенситу, нітридів та карбідів) згідно з ГОСТ 8233 [106];
- оцінювання мікронеоднорідностей у сталі (смугастості, відманшtedтової структури, структурно-вільного цементиту та перліту);
- визначення глибини знеуглецьованого шару;
- з'ясування характеру та визначення глибини корозійного ураження металу;
- визначення мікротвердості структурних складових сталі.

Металографічні дослідження металу на діючих об'єктах в даний час, за рекомендацією нормативних документів, у польових умовах проводять за допомогою переносних мікроскопів (металографічних комплексів), шляхом відбору та подальшого лабораторного дослідження малих проб (темплетів) або методом «відбитку» з поверхні. При цьому встановлюють:

- величину зерна;
- характер розподілення карбідів;
- ступінь сфероїдизації перліту;
- стан міжзерневих меж;
- наявність водневої корозії і т. д.

Результати металографічного аналізу слід оформляти як звіт, у якому мікроструктура металу повинна бути представлена в фотографіях та поданий опис її характерних особливостей. Однак відбір проб для мікроструктурного аналізу призводить до пошкодження поверхневого шару об'єкта, а використання переносних мікроскопів вимагає ретельну підготовку поверхні із застосуванням хімічного травлення, що призводить до появи міжкристалічної корозії матеріалу. А контроль мікроструктури поверхневого шару не відображає, як і при вимірюванні твердості поверхневого шару, картини стану матеріалу в тілі об'єкта, що може суттєво відрізнятись.

При тривалій експлуатації промислових трубопроводів проходять незворотні мікроструктурні зміни характеристик металу, що проявляються у зниженні пластичності, вираженої в наближенні величин границі плинності  $\sigma_m$  і границі міцності  $\sigma_e$ .

Допустимі значення перерахованих параметрів, приведених до температури 20 °С, для труб із низьковуглецевої сталі повинні бути в межах  $\sigma_{mf}/\sigma_{ef} \leq 0,9$ .

Фактичні значення механічних характеристик сталі  $\sigma_{mf}$ ,  $\sigma_{ef}$  визначаються шляхом перерахунку значень твердості, отриманих з допомогою переносного твердоміра за емпіричною методикою. Однак вона забезпечує необхідну точність та достовірність тільки для трубних сталей.

В інструкції РД 03-410-01 [107] зазначається, що для визначення фізико-механічних характеристик матеріалу внутрішньої оболонки ізотермічних резервуарів використовують дюрOMETричний метод, який використовується для визначення границі плинності та міцності за виміряними значенням твердості.

Границя плинності для низьколегованих сталей в інтервалі від 20 до 45 кгс/мм<sup>2</sup> розраховується за результатами хімічного та кількісного металографічного аналізу за формулою

$$\sigma_T = (\sigma_o^2 + \sigma_n^2)^{1/2} + (\Delta\sigma_{T.P.}^2 + \Delta\sigma_{D.Y.}^2 + \Delta\sigma_D^2)^{1/2} + K_y d^{-1/2}, \quad (4.1)$$

де  $\sigma_o$  – напруження тертя решітки  $\alpha$ -заліза, для даного розрахунку приймається рівним 30 МПа;

$\sigma_n$  – напруження за рахунок зміцнення сталі перлітом;

$\sigma_n = 2,4\Pi$ , МПа, де  $\Pi$  – процент перлітної складової;

$\Delta\sigma_{T.P.}$  – напруження за рахунок зміцнення твердого розчину легуючими елементами:  $\Delta\sigma_{m.p.} = 4670C_C + N + 33C_{Mn} + 86C_{Si} + 31C_{Cr} + 30C_{Ni} + 11C_{Mo} + 60C_{Al} + 39C_{Cu} + 690C_P + 3C_V + 82C_{Ti}$ , МПа;

$\Delta\sigma_{D.Y.}$  – напруження за рахунок зміцнення сталі дисперсними частинами

$$\Delta\sigma_{D.Y.} = \frac{0,46Gb}{\lambda - D} \ln\left(\frac{\lambda - D}{2b}\right), \quad (4.2)$$

де  $G = 8,4 \cdot 10^4$  МПа – модуль зсуву;

$b = 2,5 \cdot 10^{-7}$  мм – вектор Бюргерса;

$D$  – діаметр дисперсних зміцнюючих частин, мм;

$\lambda$  – віддаль між частинками, мм;

$\Delta\sigma_D$  – напруження за рахунок зміцнення дислокаціями, оцінюється по густині дислокацій  $\rho$

$$\Delta\sigma_D = 5Gb\rho^{1/2}, \quad (4.3)$$

де  $d$  – середній діаметр зерна фериту, що визначається за ГОСТ 5639-82;

$K_y = 20$  МПа·мм<sup>1/2</sup>.

Аналіз нормативних документів, що регламентують визначення якості сталей при процедурі технічного діагностування нафтогазового обладнання,

показав, що вони здебільшого базуються на вимірюванні твердості та металографічних дослідженнях. Твердість, виміряна портативними твердомірами, характеризує фактичний стан поверхневого шару об'єкту контролю. Тому в більшості випадків вимірювання твердості не достатньо, щоб судити про технічний стан металоконструкцій. Використання магнітних інформативних параметрів обмежується тільки феромагнітними матеріалами. Крім того залежності механічних характеристик від магнітних параметрів носить неоднозначний характер.

Враховуючи вище сказане, необхідно розробити метод, який би регламентував весь комплекс застосовуваних методів, засобів та необхідних операцій щодо оцінювання якості та встановленні якісних змін матеріалів з урахуванням мікроструктури без руйнування матеріалу. Крім того слід застосувати комплексний підхід для збільшення достовірності результатів контролю. Даний метод необхідно робити складовою частиною нормативних документів, де він повинен регламентувати порядок контрольних операцій, які необхідно здійснювати для оцінки фактичного технічного стану обладнання з урахуванням стану його металу.

#### 4.1 Метод оцінювання стану мікроструктури

Метод встановлює порядок і методи виконання вимірювань (експрес-визначення) середнього розміру зерна та співвідношення перліт/ферит доевтектоїдних сталей (таблиця 3.1, розділ 3), з яких виготовлені елементи нафтогазового обладнання, що працюють в умовах циклічних навантажень, як в умовах підприємств, так і в польових умовах.

Метод призначений для спеціалістів організацій, що здійснюють контроль за фактичним технічним станом обладнання у нафтогазовій промисловості.

Метод поширюється на відповідальні елементи обладнання, що перебувають в експлуатації тривалий термін, а саме труби усіх типорозмірів,

резервуари, каркаси бурових веж, привідні вали, гаки та гальмівні елементи бурових установок та рами верстатів-гойдалок, які виготовлені з конструкційних вуглецевих та низьколегованих сталей феритного класу.

Даний метод із урахуванням стану мікроструктури, її незворотних змін може бути використаний як комплексний метод контролю технічного стану обладнання при визначенні механічних характеристик за розміром зерна, моніторингу динаміки змін в мікроструктурі сталей та при розрахунках залишкового ресурсу.

Середній розмір зерна та співвідношення структурних складових перліт/ферит є кількісними характеристиками мікроструктури, що визначаються в основному металографічним методом за ГОСТ 5639 – 82, і є критеріями якості вихідного металу та величин механічних характеристик.

Середній розмір зерна вимірюється в мкм, співвідношення фаз є результатом відношення відсоткових значень об'ємної концентрації кожної структурної складової від загального об'єму і, відповідно, є величиною безрозмірною.

Діапазон вимірювання умовного розміру зерна: 13 – 60 мкм.

Діапазон вимірювання співвідношення P/Fe: 0,1 – 9,0.

#### 4.1.1 Методи вимірювань

4.1.1.1 У ході виконання вимірювань кількісних характеристик мікроструктури конструкційних сталей використовують метод багатократних опосередкованих вимірювань за допомогою комплекту засобів, до якого входить динамічний твердомір, коерцитиметр, прилад ІВС-І2 і персональний комп'ютер з необхідним програмним забезпеченням.

4.1.1.2 Як інформативні параметри для окремого визначення середнього діаметру зерна та відношення перліт/ферит (далі P/Fe) використовується інформація про твердість поверхні, коерцитивну силу та умовний індуктивний магнітний параметр  $I$ , які обробляються в комплексі за допомогою штучних

нейронних мереж, реалізованих у вигляді програмного забезпечення портативного комп'ютера.

4.1.1.3 Для вимірювання інформативних фізико-механічних параметрів використовують динамічний твердомір типу ТД-32 або контактнорезонансний твердомір типу ТКР-35, коерцитиметр з П-подібним намагнічувачем та ІВС-І2 з індуктивним перетворювачем.

4.1.1.4 Метод вимірювання кількісних характеристик мікроструктури ґрунтується на встановлених експериментальним шляхом кореляційних зв'язках між значеннями інформативних фізичних параметрів, визначених на зразках конструкційних сталей феритного класу з різними характеристиками мікроструктури, отриманими через оптичні металографічні дослідження.

4.1.1.5 Мікроструктурні параметри розраховуються автоматично встановленим на персональний комп'ютер програмним забезпеченням, використовуючи алгоритми штучних нейронних мереж.

4.1.1.6 З метою виконання розрахунків програмним засобом мікроструктурних параметрів матеріалів інших металоконструкцій (наприклад, резервуари, труби нафтогазового сортаменту тощо), необхідно кореляційний зв'язок між інформативними параметрами та параметрами мікроструктури встановлювати в кожній організації на основі інформаційного масиву для кожної групи чи класу сталей окремо.

4.1.1.7 Для остаточної обробки вимірювальної інформації використані алгоритми штучних нейронних мереж, що забезпечують достовірність результатів контролю.

#### 4.1.2. Засоби вимірювань

4.1.2.1 Для виконання вимірювань параметрів мікроструктури конструкційних сталей використовують технічні засоби для одержання інформативних параметрів, а саме твердомір типу ТД-32 або контактнорезонансний твердомір типу ТКР-35, коерцитиметр з П-подібним

намагнічувачем та ІВС-І2 з індуктивним перетворювачем, що використовуються в подальшому розрахунку за допомогою розроблених алгоритмів штучних нейронних мереж та видачі результатів.

4.1.2.2 Для вимірювання твердості металу використовують твердомір ТД-32 або контактнo-резонансний типу ТКР-35. Основні технічні характеристики його наведені в додатку А. Виміряні значення твердості вводять через клавіатуру в портативний комп'ютер і в подальшому використовують для розрахунків параметрів мікроструктури.

4.1.2.3 Для вимірювання індуктивного параметру  $I$  використовують ІВС-І2. Основні технічні характеристики її наведені в додатку Б. Виміряні значення параметру (частота) вводять через клавіатуру в портативний комп'ютер і в подальшому використовують для розрахунків параметрів мікроструктури.

4.1.2.4 Для вимірювання коерцитивної сили використовують коерцитиметр типу КРМ-Ц-К або його аналоги. Основні технічні характеристики його наведені в додатку В. Виміряні значення твердості вводять через клавіатуру в портативний комп'ютер і в подальшому використовують для розрахунків параметрів мікроструктури.

4.1.2.5 Для оброблення інформації, яка отримана з засобів вимірювань, служить портативний комп'ютер, який виконує розрахунок параметрів мікроструктури за одержаними даними відповідно до алгоритму розрахунку, що знаходиться в пам'яті комп'ютера.

### 4.1.3 Умови вимірювань

4.1.3.1 Умови та режими вимірювань, інші особливості вказані в п.4.1.2, при цьому:

- забороняється працювати в дощ і під час грози; не допускається попадання атмосферних опадів на прилади чи випадання роси за підвищеної вологості;

- ІВС-І2 та коерцитиметр повинні розміщуватися на стійкій горизонтальній основі, що виключає вібрацію, удари, падіння;
- освітленість повинна бути достатньою для зчитування показів;
- на контрольованій ділянці об'єкту контролю необхідно виключити можливість появи наведеного електромагнітного поля на контрольовану ділянку.

#### 4.1.4 Підготовка до виконання вимірювань

4.1.4.1 До проведення оцінювання стану металу власник об'єкту контролю (представник організації, яка експлуатує обладнання) повинен:

- видати наказ про організацію обстеження обладнання з призначенням відповідальної особи;
- підготувати об'єкти до проведення вимірювань;
- надати представникам організації, яка проводить вимірювання, технічну документацію, необхідну для проведення обстеження елементів обладнання;
- за чергової оцінки стану металу – надати результати попереднього технічного діагностування.

4.1.4.2 Перед початком виконання вимірювань керівник робіт повинен пересвідчитись в наявності всіх необхідних для його проведення матеріалів, приладів та інструментів і підготувати апаратуру у відповідності з її експлуатаційною документацією.

4.1.4.3 Необхідно визначити місця ділянок обладнання, на яких необхідно виконувати обстеження стану металу. У першу чергу контролю підлягають ділянки, на яких очікується надмірна або значна концентрація напружень в ході експлуатації. Такі ділянки також можуть бути визначені за результатами контролю напружено-деформованого стану елементів конструкцій (місця найбільших напружень) або вимогами чинних нормативних документів.

4.1.4.4 На контрольованих ділянках конструкції не допускається наявність дефектів типу порушення суцільності. З метою їх виявлення необхідно застосовувати стандартні оптичні чи акустичні методи контролю.

4.1.4.5 У ході підготовки до виконання вимірювань необхідно:

а) виключити фактори, що впливають на збільшення похибки вимірювань:

- вібрації та удари в корпуси приладу;
- вимірювання виконують в умовах нормальних для приладів, за дотримання заданого Виробниками режимів роботи.

б) провести наступні дії:

- оглянути робоче місце і визначити ділянки конструкції для проведення вимірювань: контактні поверхні, спряжені елементи, зони навколо зварних з'єднань, зони примикання опорних конструкцій, зони з наявністю деформацій поверхонь;

- оглянути засоби вимірювань і переконатися у відсутності слідів механічних пошкоджень корпусів, рідкокристалічних дисплеїв, відсутність порушення ізоляції та обривів кабелів зв'язку первинних перетворювачів і пристроїв з корпусами відповідних приладів.

4.1.4.6 Перед проведенням вимірювань, необхідно здійснити підготовку поверхні об'єкта контролю, яка полягає в її очищенні від ізоляції, бруду, продуктів корозії, фарби, лаків та інших забруднень.

4.1.4.7 Вимірювання здійснюється не ближче ніж за 150 мм до зварного з'єднання чи вільного кінця (краю) елемента конструкції.

4.1.5 Проведення вимірювань та оброблення результатів

4.1.5.1 Вимірювання фізико-механічних параметрів конструкційних сталей проводиться як в умовах підприємств, так і в польових умовах. Вимірювання проводиться одним чи двома операторами.

4.1.5.2 За умови відсутності дефектів типу порушення суцільності та після обробленої відповідно до п.4.1.4.7 поверхні елемента конструкції провести вимірювання твердості, коерцитивної сили та магнітного параметра  $I$ .

4.1.5.3 За допомогою динамічного твердоміра необхідно виміряти твердість за результатами п'ятикратних вимірювань в місцях, де передбачається визначення стану металу з урахуванням параметрів мікроструктури. Правила користування твердоміром визначено в його експлуатаційних документах. Усереднене вимірне значення твердості вводиться через клавіатуру в портативний комп'ютер.

4.1.5.4 За допомогою коерцитиметра КРМ-Ц-К необхідно визначити коерцитивну силу за результатами п'ятикратних вимірювань в різних напрямках в місцях, де передбачається визначення стану металу з урахуванням параметрів мікроструктури. Правила користування коерцитиметром визначено в його експлуатаційних документах. Усереднене вимірне значення коерцитивної сили вводиться через клавіатуру в портативний комп'ютер.

4.1.5.5 За допомогою ІВС-І2 необхідно визначити індуктивний параметр  $I$  за результатами п'ятикратних вимірювань в різних напрямках в місцях, де передбачається визначення стану металу з урахуванням параметрів мікроструктури. Правила користування приладом визначено в його експлуатаційних документах. Усереднене вимірне значення індуктивного параметру вводиться через клавіатуру в портативний комп'ютер.

4.1.5.6 Після введення у портативний комп'ютер вимірних значень твердості, коерцитивної сили та індуктивного параметру  $I$  відбувається розрахунок співвідношення  $P/Fe$  за нейромережевим алгоритмом. Тривалість розрахунку складає від 1 до 3 с. Розрахунок значення співвідношення  $P/Fe$  здійснюється за формулою 3.3 (розділ 3)

$$P/Fe = \frac{20}{1 + e^{-2 \left( \sum_{n=1}^{10} (LW\{2,1\}) \left[ \frac{2}{-2 \sum_{n=1}^{10} (IW\{1,1\}) \left( \left( \frac{HB-100}{200} \right) \cdot \left( \frac{HC-1}{12} \right) \cdot \left( \frac{I-1500}{100} \right)^{1+b\{1\}} \right) - 1 \right]} \right)} - 13,069}$$

де  $HB$  – твердість за шкалою Брінеля;  $HC$  – коерцитивна сила;  $I$  – значення індуктивного параметра.  $IW\{1,1\}$  – масив чисел розмірністю  $10 \times 3$ ;  $b\{1\}$  – масив чисел розмірністю  $10 \times 1$ ;  $LW\{2,1\}$  – масив чисел розмірністю  $1 \times 10$ :

$IW\{1,1\}$			$b\{1\}$	$LW\{2,1\}$		
-4,1656	1,4331	-4,8186	6,2494	1,4728	-1,4412	-0,4615
-2,6550	-5,4061	2,3210	5,1356	2,7854	0,8065	-0,0005
-0,6310	-6,1904	1,5350	4,0759	-1,8083	-1,9147	-0,3791
-4,4556	4,7123	-0,7360	3,0807	-0,6274	-0,2625	-0,6670
4,4490	3,9985	2,4544	-2,3848			
-5,0646	-0,2209	5,0803	0,8095			
-1,8824	-4,8870	3,4906	-0,4296			
-5,2400	3,0727	-2,7851	-0,7284			
-2,8943	-2,0863	4,2344	-3,5397			
-5,7949	-3,5452	0,2130	-1,7552			
0,9848	6,7682	-1,0718	4,1977			
2,3769	-4,4281	-3,9804	6,3979			

4.1.5.7 Для визначення середнього розміру зерна необхідно провести вимірювання згідно п.4.1.5.3 – 4.1.5.3.

4.1.5.8 Після введення у портативний комп'ютер вимірних значень твердості та коерцитивної сили відбувається розрахунок середнього розміру зерна за нейромережевим алгоритмом. Тривалість розрахунку складає від 1 до 3 с. Розрахунок значення розміру зерна  $\bar{D}$  здійснюється за формулою 3.4 (розділ 3)

$$\bar{D} = \frac{290}{1 + e^{-2 \left( \sum_{n=1}^{12} LW\{2,1\} \cdot \left( \frac{2}{1 + e^{-2 \cdot \sum_{n=1}^{12} (IW\{1,1\} \cdot \left[ \left( \frac{HB-100}{200} \right) \cdot \left( \frac{HC-1}{12} \right) \right] + b\{1\}} \right) - 1 \right)} \right)} - 150,034,$$

де  $HB$  – твердість за шкалою Брінеля;  $HC$  – коерцитивна сила;  $IW\{1,1\}$  – масив чисел розмірністю  $12 \times 2$ ;  $b\{1\}$  – масив чисел розмірністю  $12 \times 1$ ;  $LW\{2,1\}$  – масив чисел розмірністю  $1 \times 12$ :

$IW\{1,1\}$	$b\{1\}$	$LW\{2,1\}$
1,3872 -5,0116	-4,3725	0,9453 0,5046 -0,6039
4,0241 -2,6422	-4,0479	0,9003 -0,2152 -0,5486
-1,0445 4,3200	3,5667	0,7526 1,7563 -0,1680
-3,4963 3,3885	2,2581	0,4709 -0,3763 0,5127
-4,3293 2,6011	0,5555	
2,7531 -4,1623	0,2131	
3,2753 -3,7151	0,6339	
2,3892 4,3847	1,1185	
-2,3143 4,2622	-2,2069	
4,3073 -2,3180	3,1574	
0,3587 -4,8364	3,9677	
4,6108 -1,7246	4,7751	

4.1.5.9 Після вимірювань результати зберегти в пам'яті персонального комп'ютера та вимкнути засоби вимірювань.

Результати визначення параметрів мікроструктури сталей за розробленим методом можуть використовуватися експлуатуючими організаціями для розрахунку дійсних значень механічних характеристик та встановлення їх відповідності заявленим під час вхідного контролю відповідних марок сталей, а також для виявлення ознак деградаційних процесів матеріалу, які виражатиметься у зміні кількісних характеристик мікроструктури на більше, ніж 10% відносно попередніх результатів обстеження обладнання тривалої експлуатації.

#### 4.2 Промислова апробація розробленого методу

Промислові випробування проводились в умовах РВУ «ЛЬВІВАВТОГАЗ» ДК «УКРАВТОГАЗ» НАК «Нафтогаз України», м.Самбір, Львівської області та ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» при проведенні робіт по експертному обстеженню технологічного обладнання і трубопроводів на території лінійної виробничо-диспетчерської станції «Броди», філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба» ПАТ «Укртранснафта» (договір №460НК/2013 від 20 травня 2013 року).

В умовах РВУ «ЛЬВІВАВТОГАЗ» ДК «УКРАВТОГАЗ» НАК «Нафтогаз України» було здійснено апробацію методу контролю якісних змін металу нафтогазопроводів з використанням запропонованого методу на двох сталевих зразках з різним терміном експлуатації.

Випробування передбачали наступне.

Робочій групі були надані:

- дані мікроструктур металу досліджуваних металоконструкцій;
- результати попередньо проведених експериментальних досліджень в спеціалізованій лабораторії металографічних досліджень кафедри технічної діагностики та моніторингу ІФНТУНГ;
- твердомір динамічний ТД-32, експериментальну інформаційно-вимірювальну систему для ІВС-І2 для визначення індуктивного параметру  $I$ , коерцитиметр КРМ-Ц-К2М (рис.4.1).

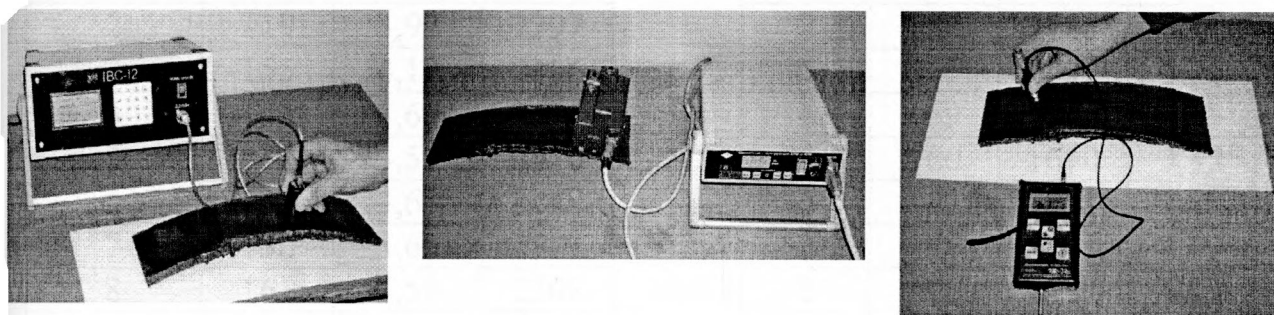


Рисунок 4.1 – Процес вимірювання фізико-механічних структурно і фазочутливих параметрів, передбачених методом контролю

Робоча група розглянула метод контролю якості металу досліджуваних металоконструкцій і результати попередніх експериментальних досліджень та погодилася проводити промислову апробацію.

Дослідження проводились на зразках з двох ділянок наземних газопроводів на території АГНКС:

- пункт шафвий газорегуляторний (ПШГ) – операторна;
- компресор – колонка №2.

Контроль проводився з метою перевірки якісного стану металу наземних газопроводів згідно із розробленим методом контролю.

Відповідно до запропонованого методу контролю у кожній точці вимірювання наземних газопроводів проводилося визначення параметрів мікроструктури (середній розмір зерна та співвідношення P/Fe) і їх змін на основі вимірювання твердості, коерцитивної сили та магнітного індукційного параметру.

В ході виконаних вимірювань було отримано такі результати (наведені в таблиці 4.1).

Таблиця 4.1 – Результати контролю фізичних параметрів металу трубної сталі труби запасу (а) та експлуатованої труби (б)

а)				б)			
№ вим.	НВ	I-1	Нс, А/см	№ вим.	НВ	I-1	Нс, А/см
1	124	4,17	2425	1	162	1788	3,58
2	119	3,92	2397	2	186	1789	3,71
3	155	4,12	2406	3	165	1693	3,76
4	133	3,66	2466	4	159	1716	3,43
5	142	3,59	2470	5	160	1690	3,92
6	131	3,63	2448	6	182	1691	3,87
7	130	3,65	2501	7	177	1741	4,09
8	161	3,58	2508	8	178	1729	4,06
9	142	3,63	2439	9	148	1732	3,72
10	147	4,47	2467	10	180	1699	3,8
11	126	4,38	2419	11	182	1715	3,76
12	151	4,3	2455	12	164	1723	4,02

Таблиця 4.2 Результати розрахунку параметрів мікроструктури згідно розробленого методу

	P/Fe	$\bar{D}$ , мкм
Труба запасу	<b>1,299</b>	<b>29,855</b>
Труба експлуатована	<b>0,978</b>	<b>29,476</b>

Для підтвердження ознак зміни параметрів мікроструктури матеріалу труб, про які свідчать результати неруйнівного контролю фізико-механічних

характеристик матеріалу, додатково на ділянках вимірювання фізичних параметрів були проведені металографічні дослідження. Для дослідження були вибрані місця зачищеної поверхні металу труби. Дослідження мікроструктури металу проводилось металографічним методом безпосередньо на трубі. За стандартною методикою виготовлено шліфи, поверхню яких піддавали травленню і вивченню з використанням переносного мікроскопа та фотографуванні при збільшеннях  $100^{\times}$ . Для травлення використано 5%-ний розчин пікринової кислоти в етиловому спирті. Кількісні параметри мікроструктури визначали за ГОСТ 5639 – 82 з використанням програмного продукту ImageJ версії m1.45, результати осереднювали за вимірюваннями в 6-ти областях розміром  $0,5 \text{ mm}^2$  на всій площині видимості знімка. Результати металографії відображені на рисунку 4.2 та в таблиці 4.3.

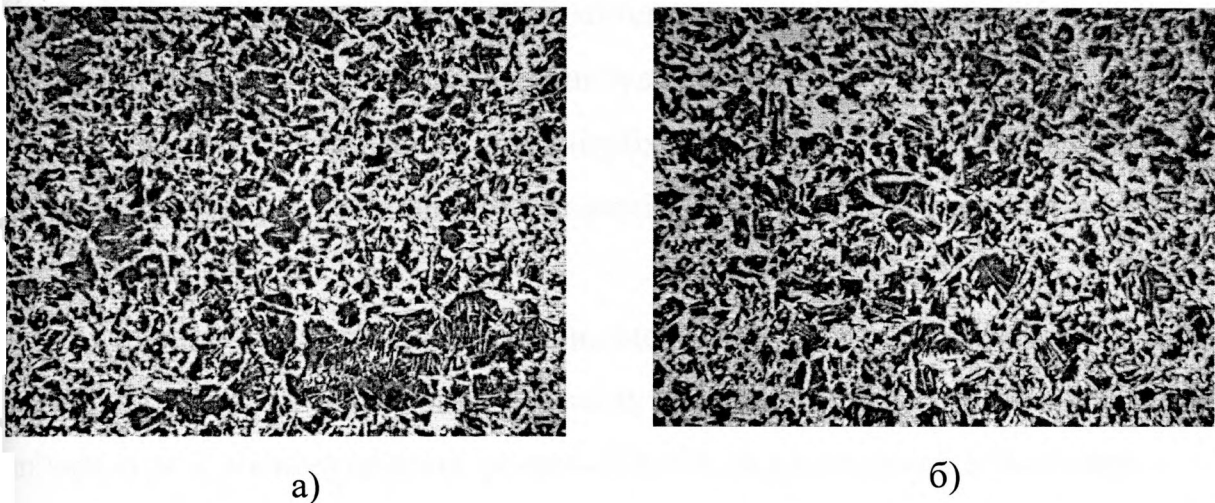


Рисунок 4.2 – Результати металографії при збільшенні  $100^{\times}$  металу трубної сталі 09Г2С запасу (а) та експлуатованої (б) (термін експлуатації – 10 років)

Таблиця 4.3 – Результати металографії

Труба запасу			
% Fe	% P	P/Fe	d, mkm
43,025	56,975	1,322	31,632
Труба експлуатована			
% Fe	% P	P/Fe	d, mkm
49,475	50,525	1,0,21	32,164

Отримані результати показують, що незначні мікроструктурні зміни металу труб присутні, однак вони не чинять значного впливу на працездатність металу.

В процесі апробації були відмічені такі недоліки запропонованого методу контролю:

1) запропонований метод контролю потребує застосування значної кількості технічних засобів, частина з яких потребує обов'язкового підключення до окремих джерел живлення, що створює деякі незручності при їх використанні;

2) необхідність залучення мінімум двох операторів для здійснення оцінки якості металу за допомогою запропонованого методу;

3) процес визначення параметрів мікроструктури вимагає наявності ЕОМ зі встановленим спеціальним математичним прикладним програмним продуктом, що вимагає навиків користування ним;

4) з метою отримання усіх необхідних експериментальних результатів потрібно мінімум 5 разів проводити вимірювання на визначеній контрольованій лілянці.

Результати апробації показали, що метод успішно пройшов промислову апробацію та після урахування вказаних недоліків може бути використаний для оцінки якості доевтектоїдних сталей об'єктів нафтогазового комплексу.

Акти промислової апробації подані в додатках Л і М відповідно.

Для практичної реалізації розробленого методу контролю якісних змін металу обладнання було прийнято участь у розробці НД, що регламентують процедуру технічного діагностування технічних об'єктів, а саме:

- Технологічний регламент «Контроль якості кільцевих з'єднань при складанні підводних трубопроводів з трубоукладальної баржі для облаштування Одеського, Безіменного та Субботінського родовищ» (погоджений з ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України, ТК 146 «Матеріали, обладнання і споруди для нафтогазової промисловості», ДП «Центр сертифікації і контролю якості будівництва об'єктів нафтогазового комплексу

Держгірпромнагляду України» (ПАТ «Державне акціонерне товариство «Чорноморнафтогаз»);

- ГОСТ ISO 13628-7:201 – Промышленность нефтяная и газовая. Проектирование и эксплуатация систем подводной добычи. Часть 7. Райзерные системы для заканчивания и ремонта скважин (ISO 13628-7:2005, IDT).

#### Висновки до розділу 4

Одержані в даному розділі результати дають змогу зробити такі висновки:

1) розроблено метод визначення кількісних параметрів мікроструктури (середній розмір зерна та співвідношення між фазними складовими мікроструктури P/Fe) за результатами вимірювання трьох фізичних параметрів (твердості, коерцитивної сили та магнітного індукційного параметру) та запропоновано способи реалізації одержаних характеристик;

2) проведено промислову апробацію методу оцінки якості матеріалів обладнання в умовах РВУ «Львівавтогаз» ДК «УкрАвтогаз» НАК «Нафтогаз України» м.Самбір, Львівської області та ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» при проведенні робіт по експертному обстеженню технологічного обладнання і трубопроводів на території лінійної виробничо-диспетчерської станції «Броди», філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба» ПАТ «Укртранснафта» (договір №460НК/2013 від 20 травня 2013 року);

3) відображена практична реалізації розробленого методу контролю якості металевих матеріалів обладнання при розробленні НД, що регламентують процедуру технічного діагностування технічних об'єктів.

## ВИСНОВКИ

В дисертації, що є завершеною науково-дослідною роботою, поставлена і вирішена актуальна науково-прикладна задача, яка полягає у розробленні методу оцінювання якості металів елементів нафтогазового обладнання за станом мікроструктури на основі вимірювання комплексу фізичних параметрів.

Найбільш важливі наукові і практичні результати полягають у наступному:

1. Проаналізовано технічний стан експлуатованого нафтогазового обладнання і встановлено, що його і рівень аварійності вимагає удосконалення методів оцінки його технічного стану, а також системи обслуговування і ремонту. Проведено аналіз особливостей зміни мікроструктури конструкційних сталей феритного класу для нафтогазового обладнання, які виникають в процесі його експлуатації. Аналіз відомих методів і засобів контролю мікроструктури сталей показав, що вони є недостатньо інформативними, не забезпечені необхідним теоретичним підґрунтям, мають ряд обмежень щодо їх застосування, а також використовуються, в основному, для якісного аналізу структурних перетворень при термічній обробці сталей. Обґрунтовано актуальність застосування багатопараметрових методів контролю з комплексним використанням структурно і фазочутливих інформативних параметрів.

2. На основі теоретичних досліджень особливостей перетворень мікроструктури гетерогенних сплавів встановлені основні структурні складові, що виділяються чи перетворюються під впливом різних чинників: поява нової фази через наявність руху дислокацій та дефектів кристалічних решіток, зміна співвідношення фазових складових сплаву, збільшення величини дисперсності окремих фаз, зміна розмірів, форми і орієнтації зерен. Незворотні зміни в мікроструктурі призводять до зміни деяких тісно з ними пов'язаних фізичних властивостей, а саме: відмічено значне зростання коерцитивної сили та магнітної індукції при виділенні в феромагнітному сплаві немагнітних фаз

(наприклад, цементиту) в навіть незначних концентраціях, при цьому магнітна проникність зменшується; питомий електричний опір сталей зростає при деформаційному наклепі та збільшенні міжзернових границь, а також сильно реагує на зміну співвідношення фаз. Як і для електричних властивостей, теплопровідність залежить від фазового стану сплаву в основному за тими ж якісними закономірностями, що і електропровідність. Ці фізичні властивості залізобуглецевих сплавів, а також твердість як структурночутлива характеристика сталей, обрані для подальших досліджень.

3. Проведені експериментальні дослідження для встановлення зв'язку між параметрами мікроструктури визначених марок конструкційних сталей (Ст.3, Ст.4, Сталі 10пс, 10, 45, 09Г2, 09Г2С, 10Г2С1, 40Г та 60Г): відношенням структурних складових перліт/ферит і середнім розміром зерна та структурночутливими фізичними властивостями цих сталей (твердість, коерцитивна сила, питомий електричний опір, магнітна індукційна та теплопровідна характеристика). Підтверджена можливість визначення вказаних параметрів мікроструктури за визначеним оптимальним числом фізичних параметрів. Визначені ті фізичні параметри контролю, що найкраще корелюють з кількісними характеристиками мікроструктури в комплексі: твердість, коерцитивна сила, магнітна індуктивна характеристика. Максимальні значення похибок визначення кількісних характеристик мікроструктури на досліджуваних сталях становлять: 2,24 % при визначенні співвідношення перліт/ферит за твердістю, коерцитивною силою та магнітним параметром при кореляції 0,92 та 1,33 % при визначенні середнього діаметру зерна за твердістю та коерцитивною силою при кореляції 0,90.

4. Розроблено технологію одержання кількісних параметрів мікроструктури для оцінки фактичного стану металу за результатами вимірювання фізичних властивостей, яку рекомендовано застосовувати для грубних елементів усіх типорозмірів, резервуарів для зберігання нафти та нафтопродуктів, каркасів та арматури бурових веж, привідних та проміжних

валів, гаків та гальмівних елементів (шківів та барабанів) бурових установок та рами верстатів-гойдалок.

1. Справочник по нефтепромысловому оборудованию / Под ред. Г.И. Бугаченко. – М.: Недра, 1983. – 233 с.

2. Башаров, М.Г. Наука – техническое – искусство – оборудование – продукция – индустриальной страны на основе промышленно-технологического метода / М.Г. Башаров, У.Ф. Клыкунов, В.Л. Талас. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – №5. – С.293–302.

Яковлева, Т.Ю. Локальная пластическая деформация и усталость сталей / Т.Ю. Яковлева. – К.: Науковий світ, 2003. – 235 с.

Исследования материалов в деформации, релаксационной и гистерезисной зависимости // Г.К. Прейбер, С.М. Персия, Б.Ф. Шибрелев. – М.: Инженерное, 1969. – 396 с.

«Механика деформации – свойства низкоуглеродистых сталей» [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.vsespb.ru/articles/1374.html>.

Прейбер, Г.К. Трубы нефтепромыслов / А.Г. Пумеров, Р.С. Закиядина, И.М. Давид, А.В. Росляков. – М.: Недра, 1995. – 222 с. – ISBN 5-247-01980-0.

Лыткин Н. П. Исследования структуры металла газопроводов после эксплуатации / Н. П. Лыткин, М. М. Калыбр, В. Н. Вадимов. – Металлы. – 2005. – №3. – С.3 – 16.

Арханов А.Г. Оценка деформации сталей обломками газопроводов в условиях эксплуатации / А.Г. Арханов, О.В. Завьялов, Д.О. Кочетков, Р.Г. Яков. // Металлы и сплавы. – 2009. – №2, Т.15. – С.117–122.

«Механика деформации – свойства и усталость сталей» [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.vsespb.ru/articles/1374.html>.

«Механика деформации – свойства и усталость сталей» [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.vsespb.ru/articles/1374.html>.

«Механика деформации – свойства и усталость сталей» [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.vsespb.ru/articles/1374.html>.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

- 1 Справочник по нефтепромысловому оборудованию / Под. ред. Е.И. Бухаленко. – М.: Недра, 1983. – 233с.
- 2 Баширов М.Г. Оценка технического состояния оборудования предприятий нефтегазовой отрасли на основе применения техноценологического метода / М.Г. Баширов, У.Ф. Юмагузин, В.Л. Талаев // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. - №5. – С.293 – 302.
- 3 Яковлева Т.Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов / Т.Ю. Яковлева. – К.: Наукова книга, 2003. – 235 с.
- 4 Конструкционные материалы в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности // Г.К. Шрейбер, С.М. Перлин, Б.Ф. Шибряев. – М.: Машиностроение, 1969. – 396 с.
- 5 О механизмах деградации свойств низколегированных сталей [Электронный ресурс] // Режим доступа - <http://www.vestipb.ru/articles3571.html>
- 6 Старение труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров, Р.С. Зайнуллин, К.М. Ямалеев, А. В. Росляков – М.: Недра, 1995. – 222с. – ISBN 5-247-03080.
- 7 Лякишев Н. П. Исследование структуры металла газопроводов после их длительной эксплуатации / Н. П. Лякишев. М. М. Кантор. В. Н. Воронин // Металлы. – 2005. - №1. – С.3 – 16.
- 8 Архипов О.Г. Оцінка деградації сталей обладнання нафтопереробних і хімічних виробництв / О.Г. Архипов, О.В. Зінченко, Д.О. Ковальов, Р.Г. Заїка. // Металеві конструкції. – 2009. - №2, Т.15. – С.115-122.
- 9 Оценка степени деградации механических свойств и остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической твердости / А.Г. Пенкин , В.Ф. Терентьев , Л.Г. Маслов // 2004 г. – Режим доступа: <http://www.sds.ru/articles/degradation/index.html>

- 10 Волжанин А.В. Диагностика состояния основного металла магистральных трубопроводов со сроком эксплуатации более 40 лет / А.В. Волжанин, А.И. Любомудров, Т.К. Сергеева // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2006. - №3. – С.5 – 13.
- 11 Брандон Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля /Д. Брандон, У. Каплан. - Москва: Техносфера, 2004. – 384 с. ISBN 5-94386-018-0
- 12 Бабич В.К. Деформационное старение стали. / В.К. Бабич, Ю.П. Гуль, И.Е. Долженков. - М.: Металлургия, 1972. – 320 с.
- 13 Карпаш О.М. Дослідження взаємозв'язку між структурним станом сталей та фізико-механічними характеристиками сталей / О.М. Карпаш, М.О. Карпаш, Є.Р. Доценко // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: В 2-х т. / Спецвипуск журналу «Фізико-хімічна механіка матеріалів». - №7. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2008 – Т. 2. – С.724-729.
- 14 Карпаш О.М. Питомий електричний опір як інформативний параметр визначення фактичних фізико-механічних характеристик конструкційних сталей / О.М. Карпаш, Є.Р. Доценко, М.О. Карпаш, А.В. Василик // Металлофізика и новейшие технологии. – 2008. – Спец. Вып., т. 30. – С.213-219.
- 15 Костин В.Н. Многопараметровые методы структуроскопии стальных изделий с использованием магнитных свойств вещества / В.Н. Костин, А.А. Осинцев, А.Н. Сташков, Т.П. Царькова // Дефектоскопия. - 2004. - №3. – С.70-81.
- 16 Богданов Е.А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования: Учеб. Пособие для вузов / Е.А. Богданов. – М.: Высш. школа, 2006. – 279 с.: ил.
- 17 Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практик. Пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин [Под. ред. В.В. Сухорукова]. – М. : Высшая школа, 1991. – 283 с.

- 18 Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий в 2 книгах [Текст]. / [Под ред. В.В. Клюева]. – М. : Машиностроение, 1986.  
Том 1. – 1986. – 482 с.: ил.  
Том 2. – 1986. – 352 с.: ил.
- 19 Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И.Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
- 20 Меркулов Л.Г. Поглощение и диффузионное рассеяние ультразвука в металлах // ЖТФ, 1957. – Т. 27. - №5. – С. 1045.
- 21 Ультразвук. Маленькая энциклопедия / [Глав. Ред. И.П. Голямина]. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
- 22 Скорость звука и структура сталей и сплавов / В.В. Муравьев, Л.Б. Зуев, К.Л. Комаров. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996. - 184 с.
- 23 Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей / М.А. Мельгуй. – Мн.: Наука и техника, 1980. – 184 с.
- 24 Физические методы контроля качества материалов: Учеб. Пособие / Под. Ред. А.А. Батаева. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 103 с.
- 25 Михеев М.Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. – М.: Наука, 1993. – 252 с. – ISBN 5-02-001622-5.
- 26 Дорофеев А.Л. Индукционная структуроскопия / А.Л. Дорофеев. – М.: «Энергия», 1973. – 176 с. С ил.
- 27 Михеев М.Н. Связь магнитных свойств со структурным состоянием вещества – физическая основа магнитного структурного анализа / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов // Дефектоскопия. – 1981. - №8. – С. 8-21.
- 28 Perez-Benitez J.A. A study of plastic deformation around a defect using the magnetic Barkhausen noise in ASTM 36 steel / J.A.Perez-Benitez, J.Capo-Sanchez, J.Anglada-Rivera, L.R. Padovese // NDT&E International. – 2008. – vol.41. – P.53-58.

- 29 Назарчук З.Т. Комплекс технічних засобів для електромагнітного неруйнівного контролю конструкцій тривалої експлуатації / З.Т. Назарчук, А.Я. Тетерко, В.Г. Рибачук, Я.П. Кулинич // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2004-2006 рр. – Київ: ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України. – 2006. – С. 39-42.
- 30 Дорофеев А.Л. Физические основы электромагнитной структуроскопии / А.Л. Дорофеев, Р.Е. Ершов. – Новосибирск.: Наука, 1985. – 182 с. – ISBN 5-1180226.
- 31 Горкунов Э.С. Взаимосвязь между магнитными, электрическими свойствами и структурным состоянием термически обработанных сталей – основа определения прочностных характеристик изделий неразрушающими методами: [методические рекомендации] / Э.С. Горкунов – Свердловск: УЦ АН СССР, 1985. – 62с.
- 32 Бида Г.В. Неразрушающий метод контроля механических свойств труб нефтяного сортамента / Г.В. Бида, Н.Д. Почуев, А.Н. Сташков // Дефектоскопия. – 2002. - №10. – С.14-29.
- 33 Бида Г.В. Неразрушающий метод контроля механических свойств труб нефтяного сортамента / Г.В. Бида, Н.Д. Почуев, А.Н. Сташков // Дефектоскопия. – 2002. - №10. – С.14-29.
- 34 Бида Г.В. Магнитные характеристики тела – параметры неразрушающего контроля качества отпуска закаленных сталей (обзор) / Г.В. Бида // Дефектоскопия. – 2002. - №6. – С.19-33.
- 35 Плотникова Г.А. О совмещении вихретокового и термоэлектрического методов при сортировке сталей по маркам / Г.А. Плотникова // Дефектоскопия. – 1983. - №10. – С.19-25.
- 36 Кузнецов И.А. Термоэлектрические датчики для контроля материалов и изделий без разрушений / И.А. Кузнецов // Дефектоскопия. – 1973. - №1. – С.5-12.

- 37 Журавлёв Л.Г. Физические методы исследования металлов и сплавов: Учебное пособие для студентов металлургических специальностей / Л.Г. Журавлёв, В.И. Филатов – Челябинск: Изд-во ЮурГУ, 2004. – 157 с.
- 38 Кашубский А.Н. Идентификация конструкционных материалов методами неразрушающего контроля физико-механических характеристик и структурных параметров: автореф. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.11.13 “Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий” / Кашубский Александр Николаевич; Красноярский гос. Техн. Ун-т. – Красноярск, 2006. – 20 с.
- 39 Бабенко Э.Г. Железоуглеродистые сплавы: учеб. Пособие / Э.Г. Бабенко. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2005. – 115 с.
- 40 Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
- 41 Сандовский В.А. Об измерении удельной электрической проводимости и магнитной проницаемости с использованием накладных вихретоковых преобразователей / В.А. Сандовский, Н.И. Носальская // Дефектоскопия. – 1991. – №12. – С.44-48.
- 42 Карпаш О.М. Проблеми питания визначення питомого електричного опору феромагнітних сталей / О.М. Карпаш, Є.Р. Доценко, М.О. Карпаш // Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2009 : 6-а національна н/т конф., 9 – 12 червня 2009 р.: збірник доповідей. - К.: УТ НКТД, 2009. – с.308-311.
- 43 Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль: Практик. Пособие / В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, В.В. Сухоруков; Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. Шк., 1992. – 312 с.
- 44 Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: «Металлургия», 1977. – 647с.
- 45 Галюс З. Теоретические основы электрохимического анализа: Пер. с польск. / Под. ред. Б.Я. Каплана. – М.: «Мир», 1974. – 552с.

- 46 Лопатин Б. А. Теоретические основы электрохимических методов анализа / Б.А. Лопатин. – М.: Высшая школа, 1975. – 294 с.
- 47 Тепловой неразрушающий контроль изделий: Научно-методическое пособие / О.Н. Будадин и др. – М.: Наука, 2002. – 472 с.
- 48 Миндюк В.Д. Особливості деградації структури матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації та оцінка можливості її діагностування в нафтогазовому комплексі // В.Д. Миндюк, Є.Р. Доценко, М.О. Карпаш / Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2011. – № 2 (28). – С.91-97.
- 49 Гриб В.В. Диагностика технического состояния оборудования нефтегазохимических производств / В.В. Гриб. — М.: Изд-во ЦНИИТЭнефтехим, 2002. – 302 с.
- 50 Карпаш О.М. Комплексний метод контролю фізико-механічних характеристик матеріалів металоконструкцій / О.М. Карпаш, Є.Р. Доценко, М.О. Карпаш // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2011. – №5. – С.40-47
- 51 Карпаш М.О. Обґрунтування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій / М.О. Карпаш // Методи та прилади контролю якості. – 2004. - № 12. – С. 30-33.
- 52 Лившиц Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б.Г. Лившиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Липецкий. – М.: «Металлургия», 1980. – 320 С.
- 53 Шматко О. А., Структура и свойства металлов и сплавов. Электрические и магнитные свойства металлов: Справочник / О.А. Шматко, Ю.В. Усов. – Киев: Наукова думка, 1987. – 325 с.
- 54 Мартин Дж. Стабильность микроструктуры металлических систем / Дж. Мартин, Р. Доэрти. – М.: Metallurgiya, 1987. – 248 с.
- 55 Орлов А.Н. Границы зерен в металлах / А.Н. Орлов, В.Н. Перевезенцев, В.В. Рыбин. – М.: Metallurgiya, 1980. – 156 с.
- 56 Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов: учеб. Для вузов / Л.П. Павлов. – М.: Высш. шк., 1987. – 239 с.

- 57 Honeycombe R.W. K. Steels. Microstructure and Properties / R.W. K. Honeycombe, H. K. D. H. Bhadeshia. – Elsevier Ltd, 2006. – 345 p.
- 58 Білокур І. П. Основи дефектоскопії: Підручник / І. П. Білокур. – К.: Азимут-Україна, 2004. – 496 с. – ISBN 966-8405-04-8
- 59 Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов: Учебное пособие для вузов / А.А. Богатов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. – 320 С. – ISBN 5 – 321 – 00276 – 2.
- 60 Доценко Є.Р. Аналіз та обґрунтування взаємозв'язку фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій із структурним станом / Є.Р. Доценко // Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії: Міжнародна н/т конф. Молодих учених, Івано-Франківськ, 16-20 вересня 2008р.: анотації. – Івано-Франківськ: Факел, 2008. - С.56.
- 61 Тацакович Н.Л. Експериментальне дослідження можливості визначення ударної в'язкості неруйнівним методом / Н.Л. Тацакович, О.М. Карпаш, М.О. Карпаш // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів «Леотест-2009»: 14 Міжнар. Наук.-техн. Конф., Славське, 16-21 лютого 2009 р.: матер. Конф. – Львів, 2009. – С. 75-76.
- 62 Кісіль І.С. Прилад для контролю фізико-механічних характеристик сталей ФМХ-1 / І.С Кісіль, М.О. Карпаш, І.Р. Ващишак // Методи та прилади контролю якості. – 2005. – № 14. – С. 77-80.
- 63 Доценко Є.Р. Експериментальні дослідження щодо перспективи застосування чотирьохконтактного методу для визначення питомого електричного опору габаритних металоконструкцій / Є.Р. Доценко, О.М. Карпаш, М.О. Карпаш, Н.Паріда // Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи : міжнародна науково-технічна конференція, 20 – 23 жовтня 2009 р. : збірник анотацій. – Івано-Франківськ : Факел, 2009. – С. 114.
- 64 Миндюк В.Д. Досвід оцінки деградації матеріалу труб аміакопроводу за результатами неруйнівного контролю їх механічних характеристик / В.Д. Миндюк, М.О. Карпаш, А.В. Яворський, І.В. Рибіцький, Є.Р. Доценко //

- 70 Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – №2. – С. 30 – 35.
- 65 Золотаревский В.С. Механические свойства металлов: Учебник для вузов. 2-е изд. / В.С. Золотаревский. – М.: Металлургия, 1983. – 352 С.
- 66 Metallographer's Guide Practices and Procedures for Irons and Steels.
- 67 Атлас макро- и микроструктур металлов и сплавов / Н.Ф. Болховитинов, Е.Н. Болховитинова. – Ленинград, 1959. – 87 с.
- 68 Металловедение и термическая обработка стали: справ. пос. – 3-е изд., перераб. и доп. В 3-х т. //Методы испытаний и исследования / Под ред. М.Л.Бернштейна, А.Г. Рахштадта – М.: Металлургия. – 1983. – 352 с.
- 69 С.Я. Палеева Контроль величины зерна металлических материалов. Учебное электронное текстовое издание. – ГОУ ВПО УГТУ-УПИ – 2006
- 70 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна: ГОСТ 5639 – 82 – [Действителен от 1983 – 01 – 01]. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 38 с.
- 71 Сталі. Мікрографічний метод визначення видимого розміру зерна (ISO 643:2003, ГОТ): ДСТУ Т50 643:2009. – Набуває чинності з 01.01.2012 згідно з наказом № 477 від 28.12.2009 р.
- 72 Бирилло И.Н. Оценка прочностного ресурса газопроводных труб с коррозионными повреждениями /И.Н. Бирилло, А.Я. Яковлев, Ю.А. Теплинский, И.Ю. Быков, В.Н. Воронин / Под общей ред. И.Ю. Быкова. – М.: Изд. ЦенрЛитНефтеГаз. – 2008. – 168 с.
- 73 Основи металлографії і пластическої деформації сталі / Г. И. Бельченко, С. И. Губенко. – К.; Донецк: Висш. головное изд-во, 1987. – 240 с.
- 74 Metallography and Microstructures // ASM Handbook, ASM Int., Materials Park, OH. -2005. – 9.
- 75 Otsu N. A thresholding selection method from greylevel histogram // IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics. – 1979. – 9. – P. 62-66.

- 76 Canny J. A. Computational Approach to Edge-Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – № 8. – P. 679-698.
- 77 Sonka M., Hlavac V., Boyle R. Image Processing, Analysis, and Machine Vision, 3rd edition. ISBN 049508252X. – Thomson Learning, Toronto, 2007. – 821 p.
- 78 Kobasyar M., Rusyn B. The Radon transform application for accurate and efficient curve detection // Intern. Conf. On Signals and Electronic Systems, ICSES'2001. – Poland: Lodz, 2001. – P. 117-120.
- 79 Lucieer A. Uncertainties in Segmentation and Their Visualisation // PhD Thesis, Utrecht University, ITC Dissertation 113, Enschede. – 2004. – P. 174.
- 80 Миндюк В.Д. Характер зв'язку між параметрами мікроструктури і фізико-механічними властивостями сталей тривалої експлуатації // В.Д. Миндюк, О.М. Карпаш, М.О. Карпаш / Фіз.-хім. Механіка матеріалів. – 2013. – №4. – С.129 – 133.
- 81 Миндюк В.Д. Експериментальна перевірка характеру зв'язку між параметрами мікроструктури і фізичними властивостями матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації для оцінки ступеню їх деградації // В.Д. Миндюк, М.О. Карпаш, Е.Р. Доценко / Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2013. - №3 (71). – С. 153 – 163.
- 82 Миндюк В.Д. Оценка деградации структуры металлоконструкций длительной эксплуатации по изменению их физических свойств // В.Д. Миндюк, М.О. Карпаш, Е.Р. Доценко / Научные известия “NDT days 2013”/“Дни на безразрушителния контрол 2013”. – 17 – 21 июня. – Созополь. – 2013. – С. 52 – 54.
- 83 Грановский В.А., Сиряя Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Т.Н. Сиряя. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
- 84 Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань: навч. Посіб. / І.С. Кісіль. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400 с.

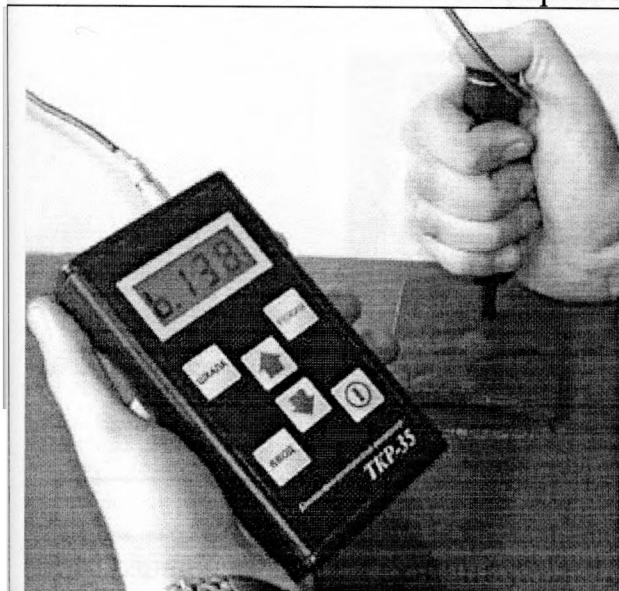
- 85 Доценко Є.Р. Експериментальні дослідження щодо можливості застосування чотирьохконтактного електричного методу для контролю питомого електричного опору габаритних сталевих конструкцій / Є.Р.Доценко, О.М. Карпаш, М.О.Карпаш // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2010. - №1. – С.186-191.
- 86 Draper, N.R.; Smith, H. (1998). Applied Regression Analysis (3rd ed.). John Wiley. ISBN 0-471-17082-8.
- 87 Лоусон Ч. Численное решение задач методом наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хенсон. — М.: Наука, 1986. – 265с.
- 88 Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. /Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2004 . – 344 с. – ISBN 5-279-02567-4.
- 89 Grossberg S. Contour enhancement, short-term memory, and consistencies in reverberating neural networks /S. Grossberg //Studies in Applied Mathematics. – 1973. – Vol. 52. – P.217-257.
- 90 Райтер П. Про можливість використання нейронних мереж для контролю багатофазних потоків / Петро Райтер, Максим Карпаш // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2002. - № 1. – С.86 -88.
- 91 Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с. – ISBN 5-8459-0890-6.
- 92 Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі: Навчальний посібник / О.Г. Руденко, Є.В. Бодяньський. – Харків: ТОВ “Компанія СМІТ”, 2006. – 404 с. – ISBN 966-8530-73-Х.
- 93 Сигеру Омату. Нейроуправление и его приложения /Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф. - М: Радиотехника, 2000. – 272 с. – ISBN: 5-93108-006-6.
- 94 Neural Network Toolbox. For use with Matlab. User’s guide. Howard Demuth, Mark Beale. Режим доступу: <http://www.mathworks.com>, 2004 – 844 p.

- 95 Неруйнівний контроль труб нафтового сортаменту: навчальний посібник / О. М. Карпаш, П. Я. Криничний, Є. І. Крижанівський [та ін.]. – Івано-Франківськ.: Факел, 2001. – 380 с. – ISBN 966-7327-78-7.
- 96 Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги: ДСТУ 4046-2001.
- 97 Магістральні трубопроводи. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами: ДСТУ-Н-Б-В23-21-2008.
- 98 Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов: РД 12-411-01 – [Введена в действие от 2001 – 09 – 15]. – Утверждена постановлением Госгортехнадзора России от 24.07.01 № 33.
- 99 Рекомендації по проведенню неруйнівного контролю бурового обладнання. ГСТУ 320.02829777.013-99. – [Чинний від 2000]. – К: Міністерство енергетики, 2000. – 26 с.
- 100 Методика технічного діагностування для продовження терміну експлуатації від амортизованого обладнання для видобутку нафти і газу. СТП 320.00135390.069-2002 – Затв. Наказом ВАТ «Укрнафта» № 118 від 15.04.2003.
- 101 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость: ГОСТ 25.502-79 – [Действителен от 1981 – 01 – 01]. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 27 с.
- 102 Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости: ГОСТ 25.504-82 – [Действителен от 1983 – 07 – 01]. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 83 с.
- 103 Металлы. Метод испытаний на растяжение (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88): ГОСТ 1497-84 – [Действителен от 1986 – 01 – 01]. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 26 с.

- 14      Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом : ГОСТ 30415-96. – [Действителен от 1998 – 01 – 01]. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. – 12 с.
- 105     Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений (ISO 4967-79): ГОСТ 1778-70. - [Действителен от 1972 – 01 – 01]. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 35 с
- 106     Сталь. Эталоны микроструктуры: ГОСТ 8233-56. - [Действителен от 1957 – 07 – 01]. – М.: Издательство стандартов, 1957. – 12 с.
- 107     Инструкция по проведению комплексного технического освидетельствования изотермических резервуаров сжиженных газов : РД 03-410-01. – [Чинний від 2002 – 01 – 01]. – М.: Госгортехнадзор России, 2002. – 110 с.

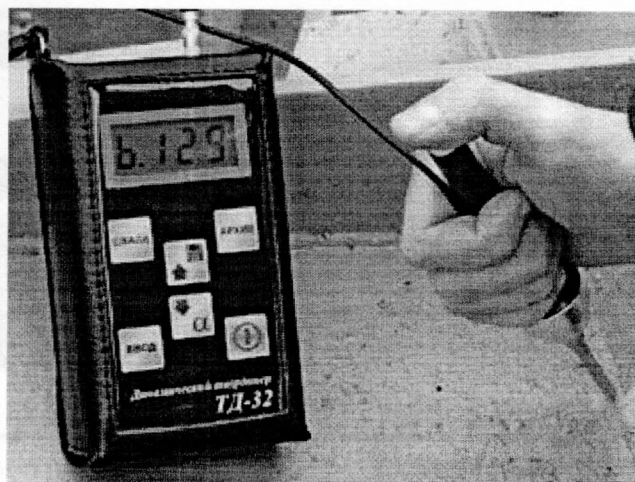
## Додаток А

## Технічні характеристики твердомірів



TKP-35

Диапазоны измерения твердости по шкалам:  
 Роквелла (20-70) HRC  
 Бринелля (100-450) HB  
 Виккерса (150-950) HV  
 Время одного измерения, с ..... 1,5  
 Питание прибора ..... батарея типа  
 КРОНА или аккумулятор 9В  
 Потребляемый ток не более, мА ..... 6,5  
 Определение значения твердости при  
 количестве измерений ..... 3...20  
 Время автоматического отключения прибора  
 после проведения последней операции,  
 мин. .... 3  
 Объем энергонезависимой памяти,  
 измерений ..... 4000  
 Шероховатость контролируемой  
 поверхности, не более, Ra ..... 2,5  
 Диапазон температур, °С ..... 0...+40  
 Масса прибора, кг ..... 0,4  
 Габаритные размеры, мм ..... 145x82x32



TD-32

Диапазоны измерений твердости по шкалам :  
 Роквелла, HRC 20 - 68  
 Бринелля, HB 95 - 460  
 Виккерса, HV 95 - 950  
 Время одного измерения, с ..... 2  
 Питание прибора ..... батарея типа  
 КРОНА или аккумулятор 9В  
 Потребляемый ток не более, мА ..... 12,5  
 Определение значения твердости при  
 количестве измерений ..... 3...10  
 Время автоматического отключения прибора  
 после проведения последней операции ..... 3  
 Объем энергонезависимой памяти,  
 измерений ..... 4000  
 Шероховатость контролируемой поверхности,  
 не более, Ra ..... 2,5  
 Диапазон температур, °С ..... -5...+40  
 Масса прибора, кг ..... 0,4  
 Габаритные размеры, мм ..... 165x82x32

## Додаток Б

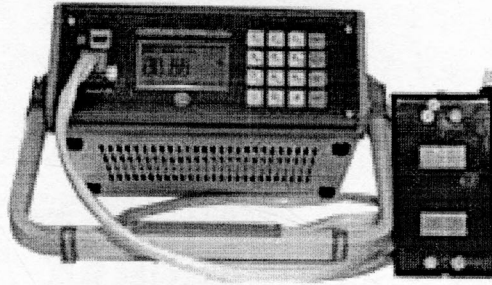
## Технічні характеристики приладу ІВС-І2



Найменування параметра	Значення
1 Границі визначення ударної в'язкості, Дж/см <sup>2</sup> : - нижня границя, не менше - верхня границя, не більше	10 175
2 Відносна допустима похибка визначення ударної в'язкості, %, не більше	5
3 Час встановлення робочого режиму, хв, не більше	2
4 Час безперервної роботи, год, не менше	8
5 Живлення приладу: вмонтований акумулятор - напруга, В, - ємність, А/год, не менше	12 4,5
6 Потужність, що споживається, Ва, не більше	20
7 Довжина кабелю з'єднання блоку оброблення інформації з індуктивним перетворювачем, м, не менше	2
8 Габаритні розміри, мм, не більше	300x260x130
9 Маса, кг, не більше	10

## Додаток В

## Технічні характеристики коерцитиметра КРМ-Ц-КЗ



Прилад розрахований для використання в лабораторних, цехових та польових умовах,

при:

- температурі зовнішнього середовища  $-20$  до  $+50$   $^{\circ}\text{C}$ ;
- відносній вологості повітря до  $80\%$  при  $+35$   $^{\circ}\text{C}$ ;
- атмосферному тиску  $760$  мм рт.ст. ( $101,3$ кПа)

Діапазон вимірювання коерцитивної сили, А/см  $1,00 \dots 40,00$ .

Межа основної допустимої похибки вимірювання коерцитивної сили Н с при температурі оточуючого повітря  $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , не більше,  $\% \pm(0,025\text{Hc} + 0,03)$ .

Межа додаткової допустимої похибки приладу при відхиленні температури зовнішнього середовища від нормальної на кожні  $10^{\circ}\text{C}$ , не більше,  $\%$  не перевищує  $0,5$  від основної похибки.

Тривалість циклу вимірювання, с, не більше ...8.

Амплітуда імпульсів намагнічування, А, не менше ... 2,0.

Час встановлення робочого режиму після включення живлення приладу, хв. ...15.

Внутрішня пам'ять у вигляді журналу, із заданою кількістю рядків та стовпців (до 16 рядків, до 250 вимірювань у кожному) з можливістю посторінкового перегляду.

Зв'язок з ЕОМ по інтерфейсу RS-232.

Швидкість передавання даних, бод ... 57600.

Час безперервної роботи – не менше 8 год.

Габаритні розміри, мм,:

- вимірювальний блок з акумулятором:

- довжина - 215;

- ширина - 210;

- висота - 80;

- зарядний пристрій:

- довжина - 120;

- ширина - 70;

- висота - 45.

- перетворювач:

- довжина - 80;

- ширина - 110;

- висота - 140.

Маса приладу, кг:

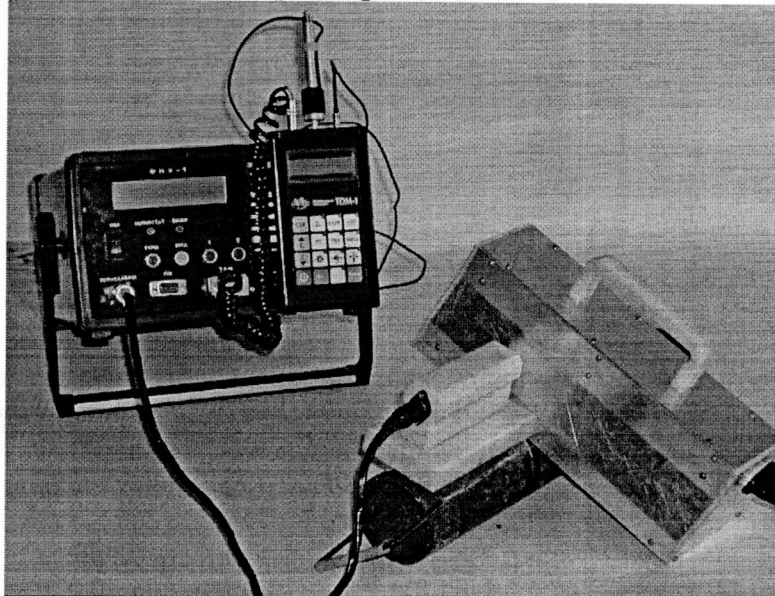
- вимірювальний блок з акумулятором – 2;

- зарядний пристрій – 0,35;

- перетворювач – 1,7.

## Додаток Г

## Технічні характеристики ІВС ФМХ-1



Діапазон визначення фізико-механічних характеристик: границі текучості – від 200 до 700 МПа, границі міцності – від 350 до 1000 МПа.

Прилад забезпечує нагрівання зовнішньої поверхні об'єкта контролю до 90 °С.

Прилад обладнаний рідкокристалічним індикатором (далі – РКІ) для відображення в цифровому вигляді вимірних значень твердості, теплопровідності та визначених значень фізико-механічних характеристик і структури сталей.

Роздільна здатність індикації границі міцності та границі текучості – 1 МПа, твердості (за шалою Брінеля) – 1 НВ.

Прилад підтримує стандартний інтерфейс RS-232 для зв'язку з персональним комп'ютером (далі – ПК) та може працювати під керуванням ПК.

Час встановлення робочого режиму приладу - не більше 20 хв.

Тривалість настроювання приладу на режим “визначення фізико-механічних характеристик” становить не більше 90 с.

Прилад для визначення фізико-механічних характеристик сталей живиться від зовнішньої мережі змінного струму (220±22) В з частотою 50±0,5 Гц.

Споживана потужність приладу (включаючи блок нагрівача) становить не більше 1,1 кВт.

Час безперервної роботи від мережі змінного струму – не менше 8 год.

Габаритні розміри, мм, не більше:

- приладу (корпусу) із твердоміром:

- довжина - 340;

- ширина - 295;

- висота - 160;

- блоку термодавачів:

- довжина - 130;

- ширина - 70;

- висота - 70.

- блоку нагрівача:

- довжина - 280;

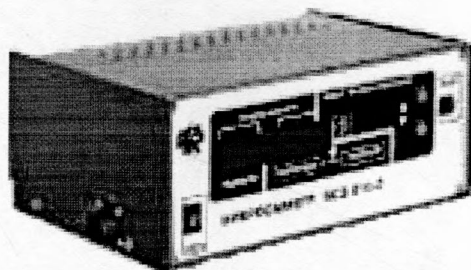
- ширина - 110;

- висота - 150.

Маса приладу (разом із блоком нагрівача), кг, не більше - за 6,5.

## Додаток Д

## Технічні характеристик приладу БСЗ-010-2



Допустима основна приведена похибка, одиниця меншого розряду та значення вимірюваного струму повинні відповідати значенням, наведеним у таблиці 1

Межа вимірювання	Одиниця молодшого розряду (о.м.р.), мкОм	Допустима основна похибка $\gamma$ , %	Значення вимірювального струму, А, не більше
1000 мОм	10,0	$\pm(0,1 + 2 \text{ о.м.р})$	0,2
100 мОм	1,0	$\pm(0,1 + 2 \text{ о.м.р})$	0,3
10 мОм	0,1	$\pm(0,1 + 4 \text{ о.м.р})$	3,0
1000 мкОм	0,01	$\pm(0,1 + 4 \text{ о.м.р})$	3,0

Допустима основна приведена похибка мікрометра реалізується при наступних умовах:

- температура оточуючого повітря, °С  $20 \pm 5$ ;
- відносна вологість повітря, %  $55 \pm 25$ ;
- атмосферний тиск, кПа (мм рт.ст.)  $84-106 (630-795)$ ;
- напруга мережі, В  $220,0 \pm 4,4$ ;
- частота напруги мережі, Гц  $50,0 \pm 0,5$ .

Допустима приведена похибка мікрометра, яка викликана відхиленням температури оточуючого повітря від нормальної, до будь-якої в межах від плюс 10 °С до плюс 40 °С, %, не більше ... плюс мінус 0,2.

Допустима приведена похибка мікрометра, яка викликана відхиленням напруги живлення від номінального до будь-якого в межах від 198 В до 242 В, %, не менше ... плюс мінус 0,1.

Допустиме перевищення вимірюваного опору над верхнім значенням межі вимірювання, %, не менше ... плюс мінус 10.

Час вимірювання без врахування часу перевірки контактування контактора мікрометра з об'єктом вимірювання, с, не більше ... 2.

Інтервал між двома послідовними однократними вимірюваннями, с, не менше ... 6.

Час установлення робочого режиму, хв., не більше ... 15.

Час безперервної роботи мікрометра в режимі:

- однократних вимірювань в межах діапазону 1000 мОм і 100 мОм, год., не менше ...

8;

- багатократних вимірювань в межах вимірювань 10 мОм і 1000 мкОм, год., не більше ... 15;

Відновлення роботи можливе після витримки мікрометра в режимі перевірки контактування (див. порядок роботи з мікрометром) на протязі не менше 10 хв.

Потужність, яку споживає мікрометр під час процедури вимірювання, ВА, не більше ... 100 ВА.

Габаритні розміри вимірювального блоку, мм, не більше ... (325 x 135 x 220).

Довжина вхідного кабелю контактора ...  $(1,5 \pm 0,05)$  м.

Маса вимірювального блоку, кг, не більше ... 6.

## Додаток Е

## Технічні характеристики верстата УРМО-80А



Диаметр отрезного круга, мм	320
Скорость вращения отрезного круга, об/мин:	2100
Скорость подачи отрезного круга, мм/мин:	2,25; 3,0; 4,0; 5,0; 7,0; 9,0; 12,0; 15,0
Максимальный диаметр разрезаемой заготовки, мм	80
Максимальная длина отрезаемой части, мм	200
Рабочее напряжение сети питания	380 В, 50 Гц
Размеры рабочего стола, мм	80x200
Мощность электродвигателя, Вт	550
Габаритные размеры, мм	840x800x600
Масса, кг	180

## Додаток Ж

## Технічні характеристики пристрою УШПО-1

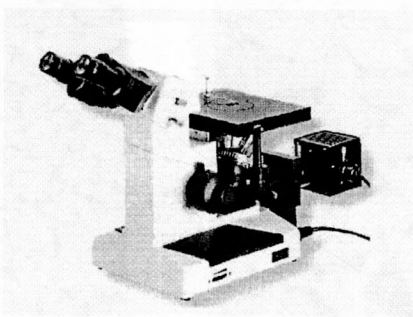


## Основные технические характеристики

Диаметр шлифовальника, мм	230
Диаметр полировальника, мм	200
Скорость вращения шлифовальника, об/мин	50 - 1000
Рабочее напряжение сети питания	220 В, 50 Гц
Мощность электродвигателя, Вт	250
Габаритные размеры, мм	615x380x270
Масса, кг	20

## Додаток 3

## Технічні характеристики металографічного мікроскопа ММО-1600АТ



## Используемые окуляры

Тип	Увеличение, крат	Фокусное расстояние, мм	Поле зрения, мм	Примечание
Окуляр для визуального наблюдения	10х	25,0	Ø18	
	16х	15,6	Ø 11	дополнительно
Раздельный окуляр	10х	25,0	Ø 17	шкала 0,1мм

## Используемые объективы (без фильтров)

Тип	Увеличение, крат	Численная апертура	Свободное расстояние, мм	Модель
Проекционный ахроматичный	10х	0,25	8,9	ММО-1600А ММО-1600АТ
	25х	0,40	0,76	
	40х	0,65	0,67	
	100х	1,25	0,44	

## Общее увеличение

Окуляры	Общее увеличение, крат				
	Объективы				
	10х	20х	25х	40х	100х
10х	100х	200х	250х	400х	1000х
16х	160х	320х	400х	640х	1600х

## Предметный столик

- перемещение в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях и вертикальное перемещение;

- габаритные размеры 200мм × 152мм;

- центральное отверстие - Ø 68мм;

-диапазон перемещения в горизонтальной плоскости 15мм × 15мм.

Регулировочная система грубой и тонкой фокусировки микроскопа обеспечивает ограничение перемещения и регулировку положения и защиту от самопроизвольного скольжения вниз предметного столика.

Цена деления маховичка изменения фокусного расстояния - 0,002мм.

Диапазон изменения расстояний между окулярами – 53 ... 75мм.

Увеличение при фотографии - 40х – 1000х.

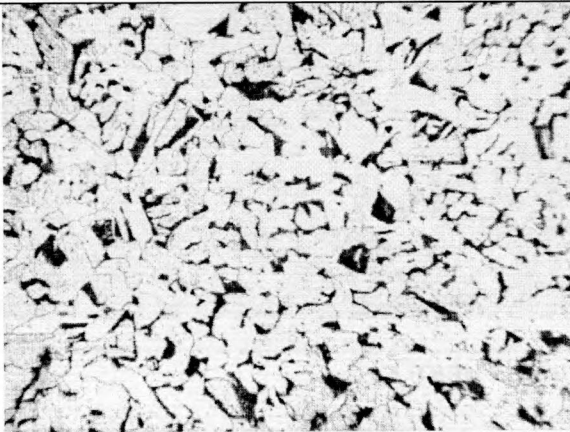
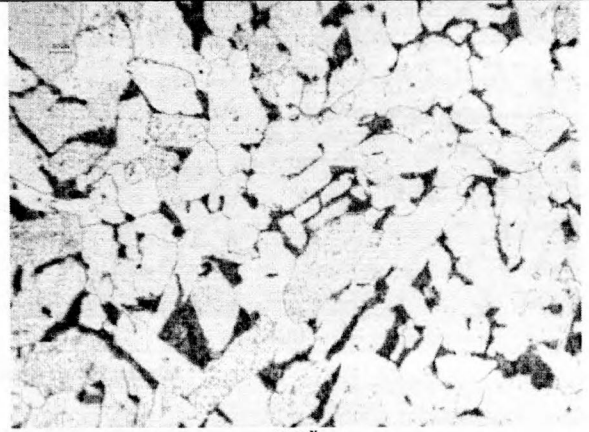
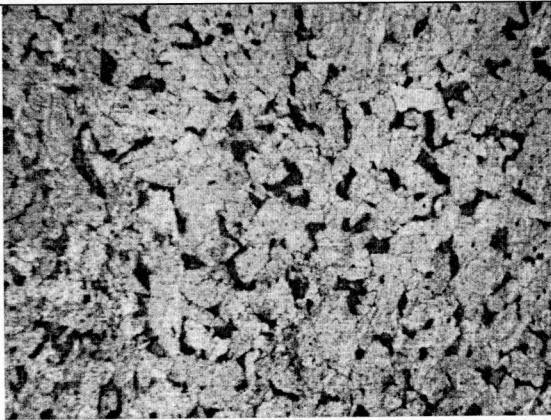
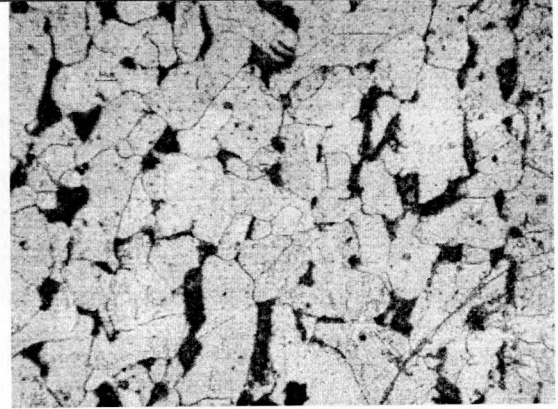
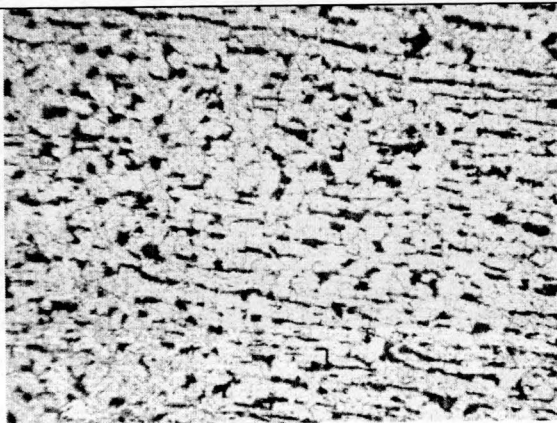
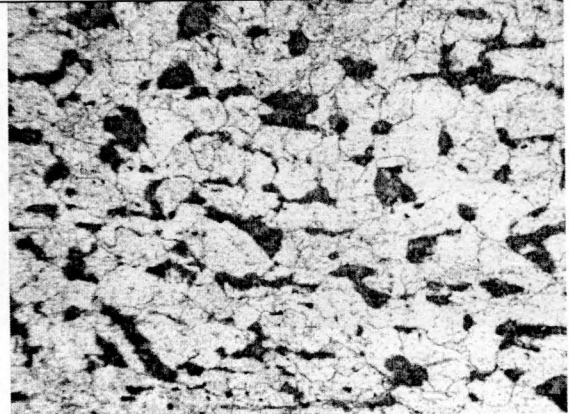
Используемые светофильтры: желтый, зеленый, голубой.

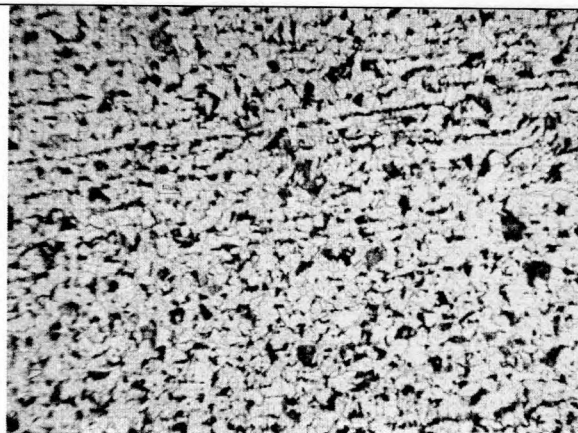
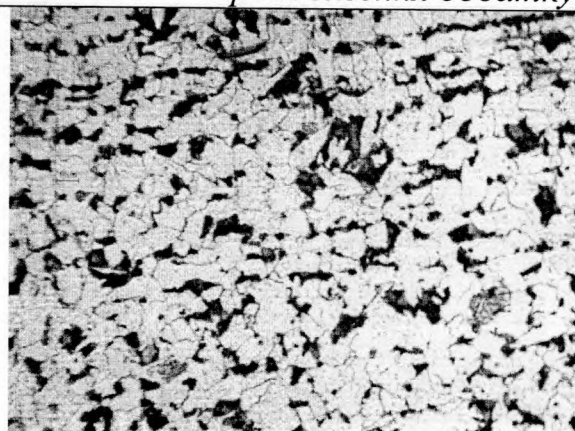
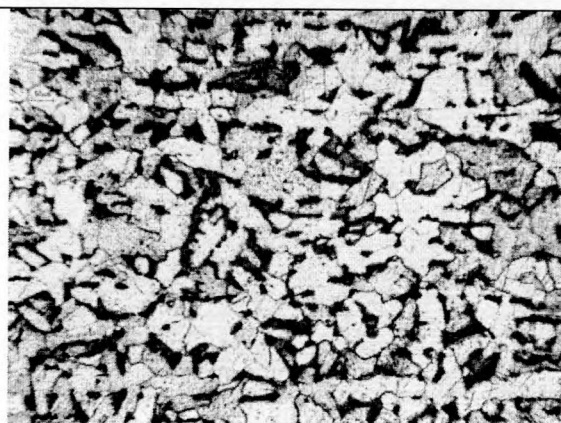
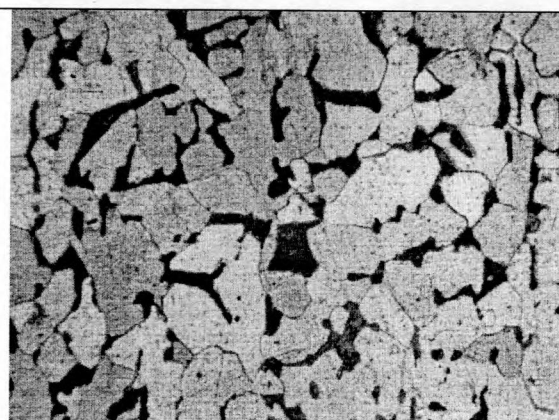
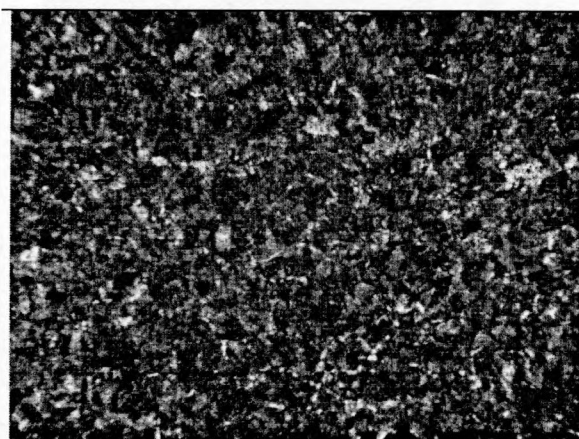
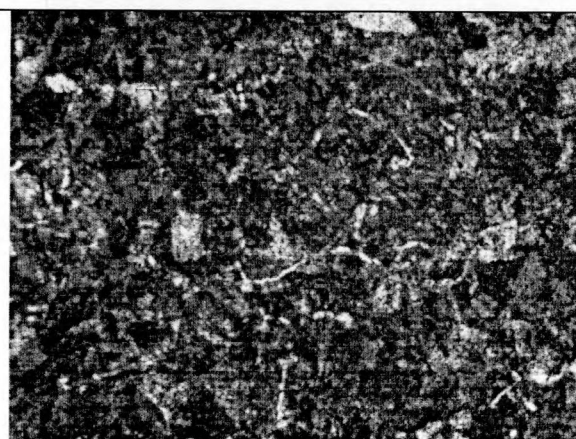
Система подсветки: галогенная лампа 20 Вт, 6В, регулируемая световая интенсивность.

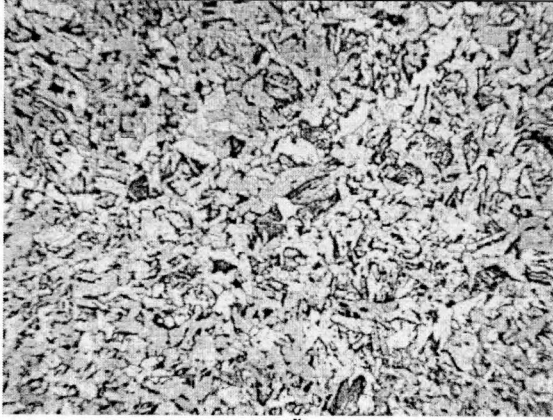
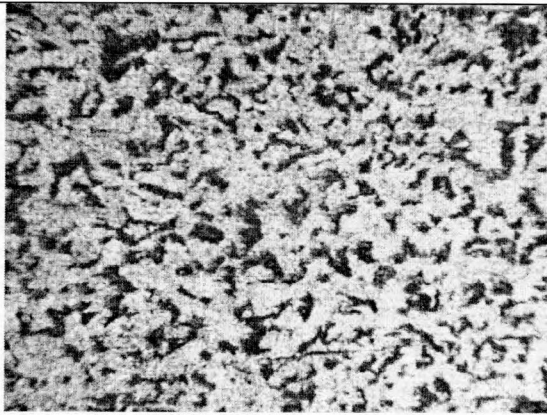
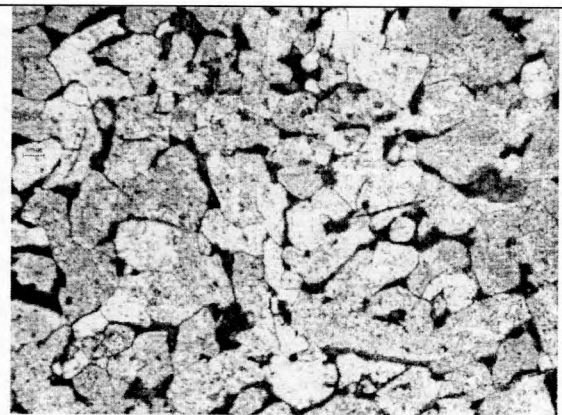
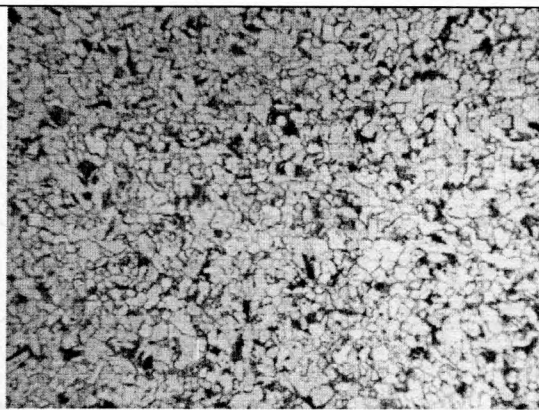
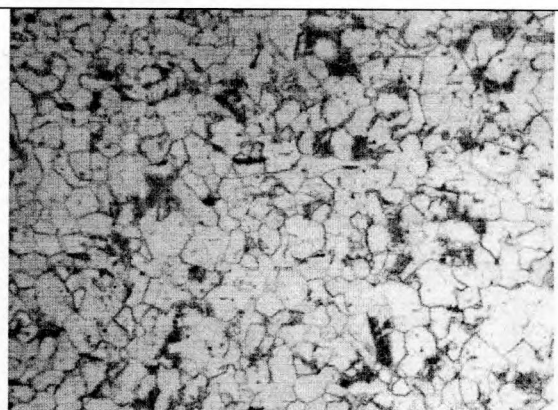
Электропитание: ~220В 50Гц.

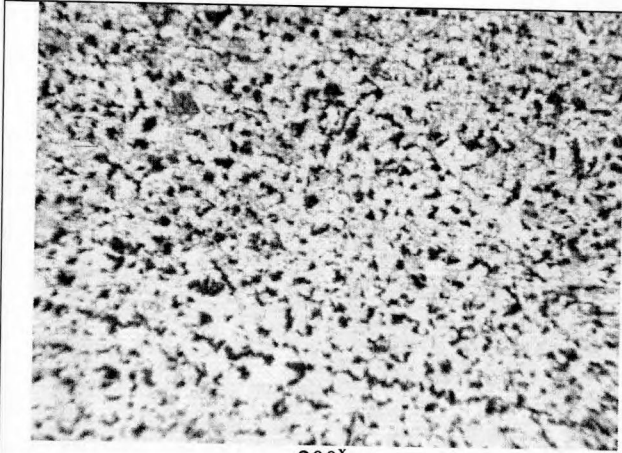
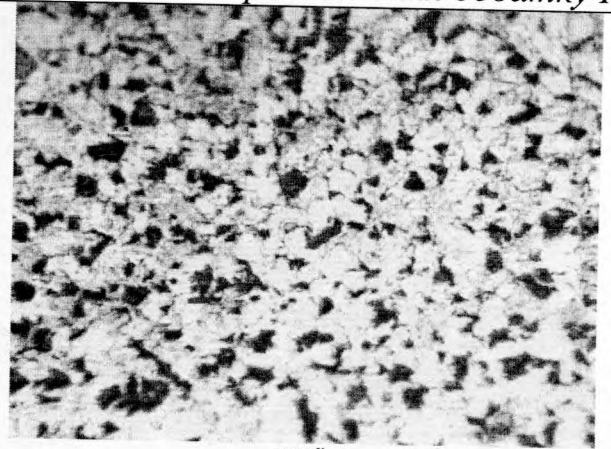
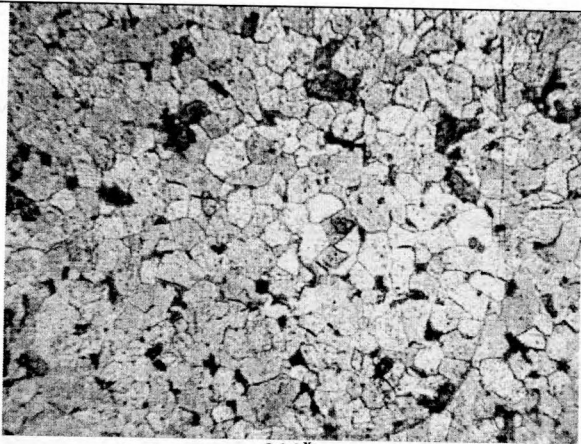
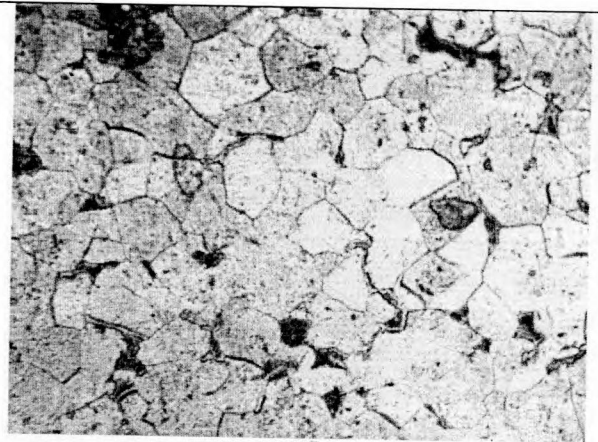
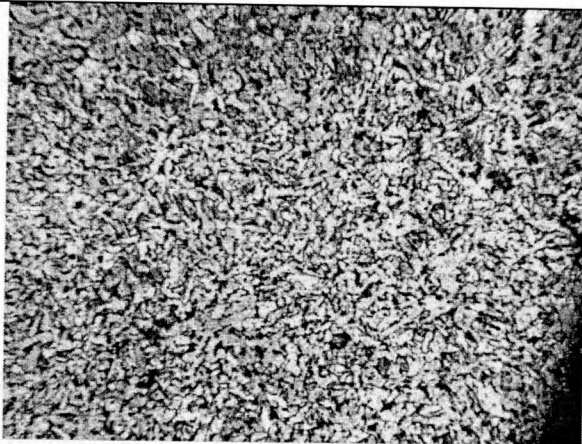
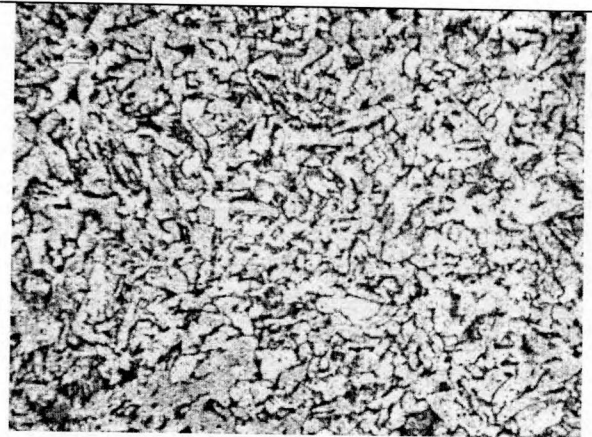
## Додаток К

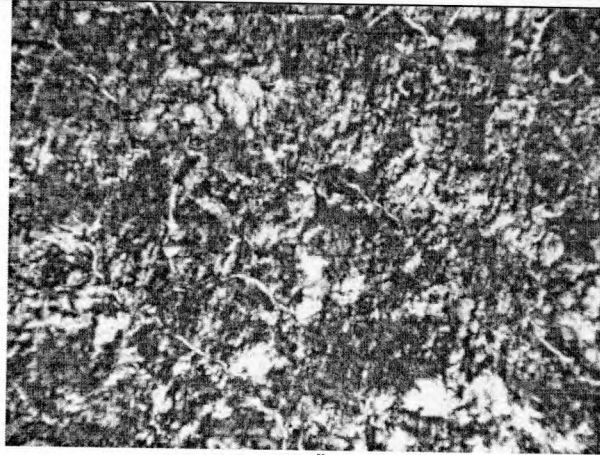
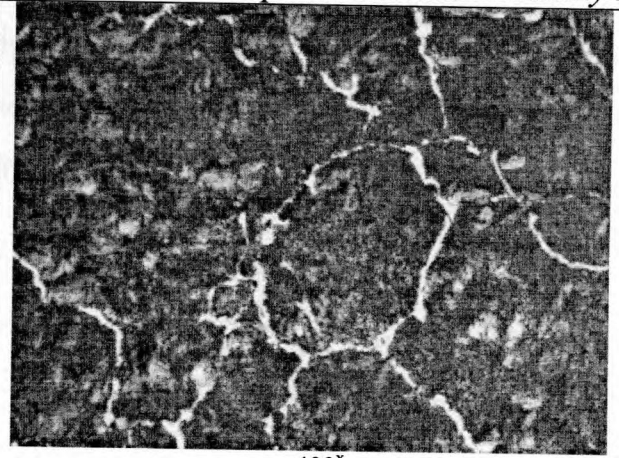
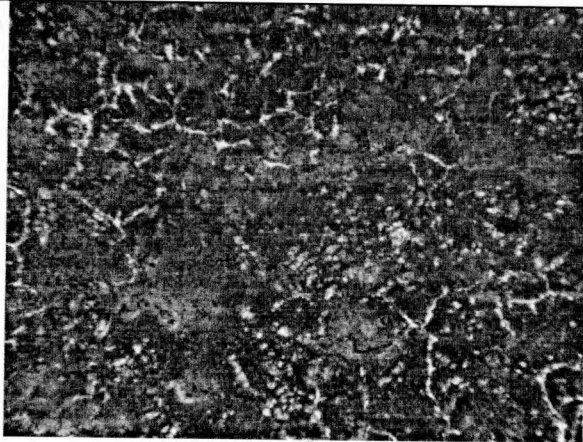
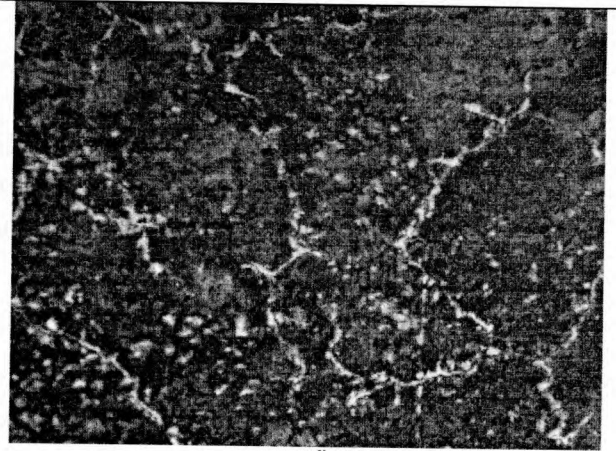
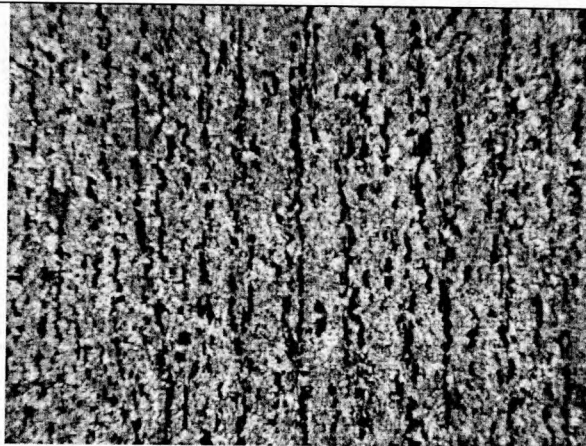
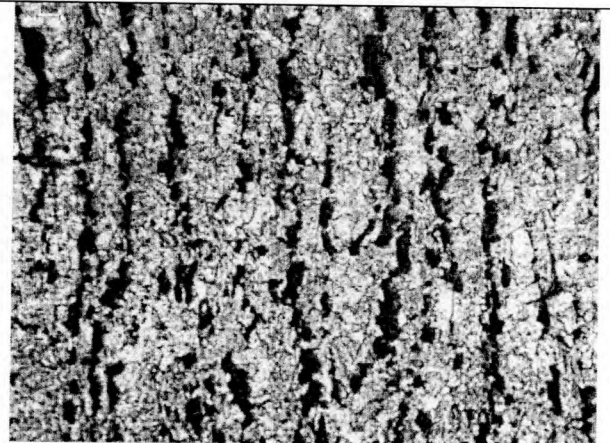
Зображення мікроструктури досліджуваних зразків конструкційних сталей

200<sup>x</sup>400<sup>x</sup>**Сталь 10пс в стані поставки**200<sup>x</sup>400<sup>x</sup>**Сталь 10 в стані поставки**200<sup>x</sup>400<sup>x</sup>**Сталь 09Г2С в стані поставки**

*Продовження додатку К*200<sup>x</sup>400<sup>x</sup>**Сталь Ст.3пс в стані поставки**200<sup>x</sup>400<sup>x</sup>**Сталь 10 після експлуатації**200<sup>x</sup>400<sup>x</sup>**Сталь 60Г в стані поставки**

*Продовження додатку К*200<sup>x</sup>400<sup>x</sup>**Сталь Ст.3пс після експлуатації**200<sup>x</sup>400<sup>x</sup>**Сталь ВСт4пс в стані поставки**200<sup>x</sup>400<sup>x</sup>**Сталь 10 після експлуатації**

*Продовження додатку К*200<sup>x</sup>400<sup>x</sup>**Сталь 10Г2С1 після експлуатації**200<sup>x</sup>400<sup>x</sup>**Сталь ВСт.4пс після експлуатації**200<sup>x</sup>400<sup>x</sup>**Сталь 09Г2С після експлуатації**

*Продовження додатку К*200<sup>x</sup>400<sup>x</sup>**Сталь 40Г в стані поставки**200<sup>x</sup>400<sup>x</sup>**Сталь 45 в стані поставки**200<sup>x</sup>400<sup>x</sup>**Сталь 09Г2 після експлуатації**

## Додаток Л

Акт промислової апробації методу вимірювання параметрів мікроструктури в умовах РВУ «ЛЬВІВАВТОГАЗ» ДП «УКРТРАВТОГАЗ» НАК «Нафтогаз України»

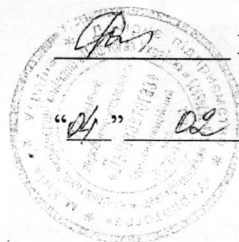
ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер

РВУ "ЛЬВІВАВТОГАЗ"

ДП "УКРАВТОГАЗ"

НАК «Нафтогаз України»



Новошицький Є.І.

"24" 09 2014 р.

## АКТ

промислової апробації методики оцінки якості матеріалів трубних металоконструкцій

## Робоча група в складі:

голови – Похмурського Б.І. – начальника відділу експлуатації РВУ "ЛЬВІВАВТОГАЗ", ДП "УКРАВТОГАЗ", НАК «Нафтогаз України»,

## і членів робочої групи:

1 Городоцького Т.В. – інженера РВУ "ЛЬВІВАВТОГАЗ", ДП "УКРАВТОГАЗ", НАК «Нафтогаз України»,

2 Тризуба М.В. – начальника АГНКС м. Самбір, РВУ "ЛЬВІВАВТОГАЗ", ДП "УКРАВТОГАЗ", НАК «Нафтогаз України»,

3 Миндюка В.Д. – асистента кафедри Технічної діагностики та моніторингу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу,

4 Мовчана Ю. В. – начальник відділу випробувально-діагностичного центру (ВДЦ) ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд»,

склала цей акт про таке:

1 27.05.2013 р. робоча група здійснила апробацію методики контролю стану мікроструктури металу нафтогазопроводів з використанням запропонованої методології.

2 Робочій групі були надані:

- методика контролю параметрів мікроструктури матеріалів металоконструкцій;

- результати попередньо проведених експериментальних досліджень в спеціалізованій лабораторії металографічних досліджень кафедри технічної діагностики та моніторингу ІФНТУНГ;
- твердомір динамічний ТД-32, експериментальну інформаційно-вимірювальну систему для ІВС-І2 для визначення індуктивного параметру  $I$ , структуроскоп КРМ-Ц-К2М (рис.1).

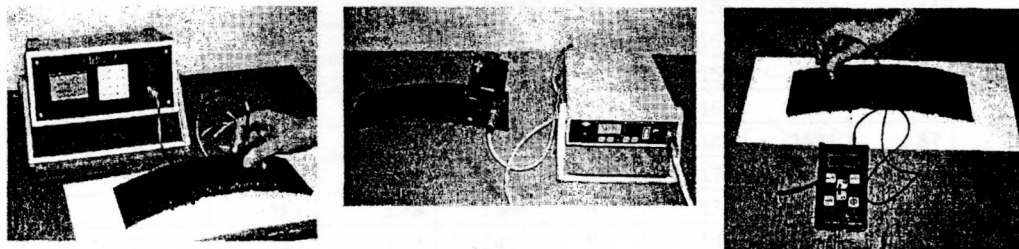


Рисунок 1 – Засоби для визначення фізико-механічних структурно і фазочутливих параметрів, передбачених методикою контролю

3 Робоча група розглянула методику контролю якості матеріалу металоконструкцій і результати попередніх експериментальних досліджень та погодилася проводити промислову апробацію.

4 Робоча група провела апробацію методики контролю якості матеріалу наземних трубопровідних конструкцій на території АГНКС РВУ "ЛЬВІВАВТОГАЗ", м. Самбір.

5 Дослідження проводились на двох ділянках наземних газопроводів на території АГНКС:

- пункт шафвий газорегуляторний (ПШГ) – операторна;
- компресор – колонка №2.

6 Контроль проводився з метою перевірки мікроструктурного стану металу наземних газопроводів згідно із розробленою методикою контролю.

7 Відповідно до запропонованої методики контролю у кожній точці вимірювання наземних газопроводів проводилося визначення параметрів мікроструктури (умовний розмір зерна та співвідношення фаз) і їх змін на основі оцінювання значень твердості, коерцитивної сили та магнітного індукційного параметру.

8 В ході проведеного контролю було отримано наступні результати (подані нижче).

Таблиця 1 – Результати контролю фізичних параметрів металу труби запасу (а) та експлуатованої труби (б)

а)				б)			
№ вим.	НВ	I-1	Нс, А/см	№ вим.	НВ	I-1	Нс, А/см
1	124	4,17	2425	1	162	1788	3,58
2	119	3,92	2397	2	186	1789	3,71
3	155	4,12	2406	3	165	1693	3,76
4	133	3,66	2466	4	159	1716	3,43
5	142	3,59	2470	5	160	1690	3,92
6	131	3,63	2448	6	182	1691	3,87
7	130	3,65	2501	7	177	1741	4,09
8	161	3,58	2508	8	178	1729	4,06
9	142	3,63	2439	9	148	1732	3,72
10	147	4,47	2467	10	180	1699	3,8
11	126	4,38	2419	11	182	1715	3,76
12	151	4,3	2455	12	164	1723	4,02

Таблиця 2 – Результати розрахунку параметрів мікроструктури

Труба запасу			
% Fe	% P	P/Fe	d, mkm
44,025	55,975	1,299	29,855
Труба експлуатована			
% Fe	% P	P/Fe	d, mkm
51,375	48,625	0,978	29,476

Для підтвердження ознак зміни параметрів мікроструктури матеріалу труб, про які свідчать результати неруйнівного контролю фізико-механічних характеристик матеріалу, додатково на ділянках вимірювання фізичних параметрів були проведені металографічні дослідження. Для дослідження були вибрані місця зачищеної поверхні металу труби. Дослідження мікроструктури металу проводилось металографічним методом безпосередньо на трубі. За стандартною методикою виготовлено шліфи, поверхню яких піддавали травленню і вивченню з використанням переносного мікроскопа та фотографуванні при збільшеннях  $100\times$ . Для травлення використано 4%-ний розчин пікринової кислоти в етиловому спирті. Кількісні параметри мікроструктури визначали за ГОСТ 5639 – 82 з використанням програмного продукту ImageJ версії m1.45, результати осереднювали за вимірюваннями в 6-ти областях розміром  $0,5 \text{ mm}^2$  на всій площині видимості знімка.

Результати металографії подані на рисунку 2.

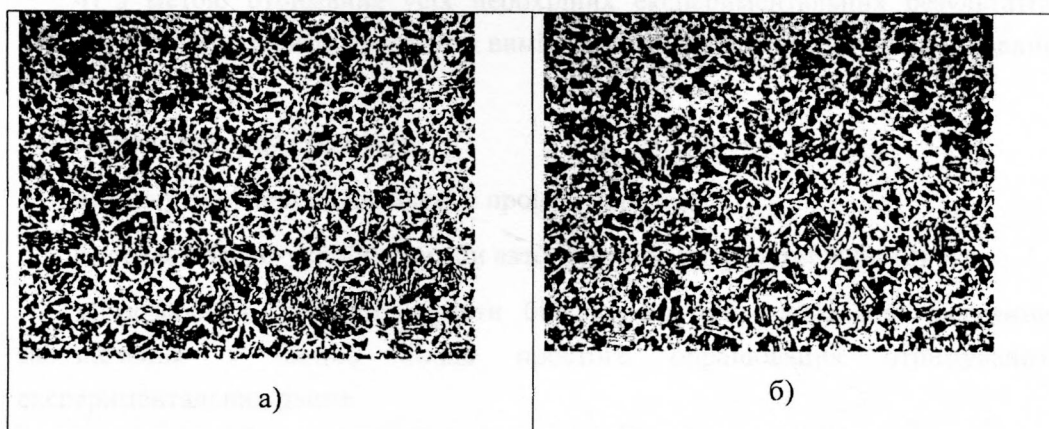


Рисунок 2 – Результати металографії металу труби запасу (а) та експлуатованої труби (б)

Таблиця 3 – Результати вимірювання параметрів мікроструктури

Труба запасу			
% Fe	% P	P/Fe	d, mkm
43,025	56,975	1,322	31,632
Труба експлуатована			
% Fe	% P	P/Fe	d, mkm
49,475	50,525	1,0,21	32,164

Згідно отриманих результатів можна судити незначні мікроструктурні зміни матеріалу труб, що виникли внаслідок тривалої експлуатації.

9 Робочою групою відзначені такі недоліки запропонованої методики контролю:

1) запропонована методика контролю потребує застосування значної кількості технічних засобів, частина з яких потребує обов'язкового підключення до окремих джерел живлення, що створює деякі незручності при її використанні;

2) необхідність залучення мінімум двох операторів для здійснення оцінки якості матеріалу за допомогою запропонованої методики;

3) процес визначення параметрів мікроструктури вимагає наявності ЕОМ зі встановленим спеціальним математичним прикладним програмним продуктом, що вимагає навиків користування ним;

## Додаток М

4) з метою отримання усіх необхідних експериментальних результатів потрібно мінімум 6 разів проводити вимірювання на визначеній контрольованій ділянці.

10 Робоча група пропонує:



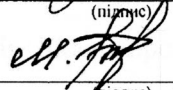
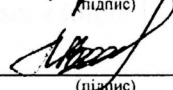

а) усунути недоліки, виявлені в процесі апробації;

б) оснастити усі технічні засоби автономними джерелами живлення;

в) розробити чи застосовувати більш доступне спеціальне програмне забезпечення з метою більш простого опрацювання отримуваних експериментальних даних.

11 Робоча група встановила, що запропонована методика контролю якості металу сталених металоконструкцій успішно пройшла промислову апробацію та після урахування вказаних недоліків може бути використана для оцінки якості матеріалу в умовах об'єктів нафтогазового комплексу.

Члени робочої групи

 _____	Похмурський Б.І
(підпис)	(ініціали, прізвище)
 _____	Городоцький Т.В.
(підпис)	(ініціали, прізвище)
 _____	Тризуб М.В.
(підпис)	(ініціали, прізвище)
 _____	В.Д. Миндюк
(підпис)	(ініціали, прізвище)
 _____	Мовчан Ю.В.
(підпис)	(ініціали, прізвище)

## Додаток М

## Акт промислової апробації методу вимірювання параметрів мікроструктури в умовах ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор НВФ «Зонд»



2017 р.

АКТ № 2/14

**впровадження результатів дисертаційної роботи**

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.12 – Розроблення методу оцінки якісних змін матеріалів нафтогазового обладнання за комплексом фізичних характеристик асистента кафедри технічної діагностики та моніторингу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу  
Миндюка Валентина Дмитровича

Комісія у складі:

**голови** – Тацаковича Назарія Любомировича – к.т.н., заступник директора ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд»

**і членів комісії:**

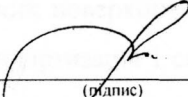
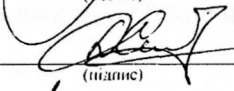

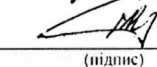
- 1 Даниляка Ярослава Богдановича – головний інженер ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд», технічний експерт з промислової безпеки технічного огляду та/або експертного обстеження обладнання газової промисловості з тиском природного газу понад 1,2 МПа
- 2 Мовчана Юрія Володимировича – начальник відділу випробувально-діагностичного центру (ВДЦ) вантажопідіймальних споруд (ВПС) ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» (II рівень VT посв. №21685, UT №26979, MT № 27317)

З Баб'яка Ярослава Михайловича – провідний інженер випробувально-діагностичного центру ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» (II рівень LT посв. №19739, II рівень VT посв. №22132)

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження (методика оцінки якості матеріалу металоконструкцій) Миндюка Валентина Дмитровича використані фахівцями ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» при проведенні робіт по експертному обстеженню технологічного обладнання і трубопроводів на території лінійної виробничо-диспетчерської станції «Броди», філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба» ПАТ «Укртранснафта» (договір №460НК/2013 від 20 травня 2013 року).

В подальшому планується застосування результатів дисертаційного дослідження Миндюка В.Д. фахівцями ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» при контролі фактичного технічного стану матеріалу металоконструкцій за параметрами його мікроструктури на території технологічних об'єктів нафтогазового комплексу.

Комісія

  
(підпис)  
  
(підпис)  
  
(підпис)  
  
(підпис)

Н.Л. Гацакович

(ініціали, прізвище)

Я.Б. Даниляк

(ініціали, прізвище)

Ю.В. Мовчан

(ініціали, прізвище)

Я.М. Баб'як

(ініціали, прізвище)

## Додаток Н

Акт впровадження результатів роботи у навчальний процес кафедри ТДМ  
ІФНТУНГ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної  
роботи  
проф. Галушак М.О.  
03 2014р.

## АКТ

впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи на  
тему: «Розроблення методу оцінки якісних змін матеріалів нафтогазового  
обладнання за комплексом фізичних характеристик» Миндюка В.Д.

У результаті виконання асистентом кафедри Миндюком Валентином  
Дмитровичем дисертаційної роботи одержані нові наукові та практичні  
результати, які активно використовуються на кафедрі «Технічної діагностики  
і моніторингу» для студентів спеціальностей:

- 1) ТВ (4-ий курс) – відновлення та підвищення зносостійкості деталей та  
конструкцій.
- 2) ТЗ – (2, 5 - курси) – технології та устаткування зварювання.
- 3) НБ, ВНГ, ПС, НО (2,4-курси) – гірництво і нафтогазова справа.
- 4) ГКЗ (4-курс)- гедезія, картографія та землеустрій.

Зокрема:

- у ході проведення лекційних і лабораторних занять з дисциплін:  
«Методи контролю стану робочих поверхонь», «Методи і засоби технічної  
діагностики», «Метрологія, стандартизація і сертифікація», «Основи метро-  
логії, стандартизації і контролю якості», «Технічна діагностика бурового та  
нафтопромислового обладнання».

- у ході проведення практичних занять з даних дисциплін.

Декан факультету нафтогазопроводів

Лісафін В.П.

Завідувач кафедри ТД і М

Карпаш О.М.

Здобувач

Миндюк В.Д.