

## АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛУ

А.М. Карпаш

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422),  
e-mail: ankarpush@i.ua

Основна кількість металевих конструкцій нафтогазового комплексу України на сьогоднішній день знаходяться в критичному стані, оскільки їх терміни експлуатації практично вичерпали свій плановий ресурс, а в деяких випадках значно перевищили його. Основними причинами аварій та відмов металомісткого обладнання на об'єктах нафтогазового комплексу є зміна фізико-механічних характеристик металоконструкцій через корозійні пошкодження металу, брак будівельно-монтажних робіт, заводський брак матеріалів і обладнання, механічні пошкодження, порушення правил технології експлуатації конструкцій. В результаті виникнення непередбачуваних відмов та аварійних ситуацій завдаються значні збитки підприємствам і організаціям України, погіршується екологічне становище та трапляються нещасні випадки.

Проведено детальний огляд методів контролю фізико-механічних характеристик металевих конструкцій об'єктів нафтогазового комплексу, які експлуатуються при різних температурних режимах та умовах. Обґрунтовано доцільність їх застосування у промисловості з практичної і економічної точок зору. Описано переваги і недоліки кожного методу та особливості застосування під час контролю того чи іншого об'єкта. Проаналізовано роботу засобів вимірювань при проведенні основних видів контролю. Удосконалення сучасних методів контролю фізико-механічних характеристик металоконструкцій дасть змогу заощадити значні фінансові кошти та запобігти виникненню аварій.

Ключові слова: технічний стан, залишковий ресурс, неруйнівний контроль, механічний контроль, магнітні методи, акустичні методи, електромагнітні методи, електричні методи, теплові методи, діагностична модель.

Основное количество металлических конструкций нефтегазового комплекса Украины на сегодняшний день находятся в критическом состоянии, так как сроки их эксплуатации практически исчерпали свой плановый ресурс, а в некоторых случаях значительно превысили его. Основными причинами аварий и отказов металлодержательного оборудования на объектах нефтегазового комплекса являются изменение физико-механических характеристик металлоконструкций вследствие коррозионного повреждения металла, брак строительно-монтажных работ, заводской брак материалов и оборудования, механические повреждения, нарушение правил технологии эксплуатации конструкций. В результате возникновения непредвиденных отказов и аварийных ситуаций наносятся значительные убытки предприятиям и организациям Украины, ухудшается экологическое состояние, и случаются несчастные случаи.

Проведен детальный обзор методов контроля физико-механических характеристик металлических конструкций объектов нефтегазового комплекса, эксплуатирующихся в различных температурных режимах и условиях. Обоснована целесообразность их использования в промышленности с практической и экономической точек зрения. Описаны преимущества и недостатки каждого метода и особенности применения при контроле того или иного объекта. Проанализирована работа средств измерений при проведении основных видов контроля. Совершенствование современных методов контроля физико-механических характеристик металлоконструкций позволит сэкономить значительные финансовые средства и предотвратить возникновение аварий.

Ключевые слова: техническое состояние, остаточный ресурс, неразрушающий контроль, механический контроль, магнитные методы, акустические методы, электромагнитные методы, электрические методы, тепловые методы, диагностическая модель.

The major part of the Ukrainian oil-and-gas complex metal constructions is currently in critical condition as their operation terms have practically exhausted the planned service life and in some cases have considerably exceeded it. The main reasons of breakdowns and faults of metal consuming equipment on oil-and-gas complex objects include the change of metal ware physical and mechanical properties as a result of metal corrosion damages, the lack of construction operations, serial defects of materials and facilities, mechanical damages, constructions mishandling. Emergency faults and breakdowns cause significant losses to Ukrainian enterprises and organizations, worsen ecological situation and contribute to the occurrence of accidents.

This article deals with the detailed review of control methods of physical and mechanical properties of oil-and-gas complex objects metal constructions which function under various temperature and operation conditions. Their characteristics and expedience of application in industry from practical and economic points of view are reasoned. The advantages and disadvantages of each method and peculiarities of their application when controlling certain objects are described. Measuring tools operation in carrying out the main control types has been analyzed. The improvement of modern control methods of metal constructions physical and mechanical properties will enable to economize a considerable quantity of financial resources and to prevent accidents.

Keywords: technical condition, remaining life, non-destructive testing, mechanical control, magnetic methods, acoustic methods, electromagnetic methods, electrical methods, thermal methods, diagnostic model.

## Вступ

Металоконструкції в нафтогазовій галузі – це складні великогабаритні системи, одні з яких експлуатуються в умовах природних корозійних середовищ, а інші – в корозійних середовищах вуглеводневих продуктів, що ними транспортуються та зберігаються в них. Спрацювання більшої частини споруд і механізмів вітчизняного нафтогазового комплексу на сьогоднішній день перевищує 50%, а на деяких об'єктах значна частина металоконструкцій повністю вичерпала свій плановий ресурс. Така ситуація призводить до того, що в Україні щорічно виникає кілька сотень надзвичайних ситуацій техногенного характеру з можливими значними економічними збитками та людськими втратами.

Основними причинами аварій та відмов на об'єктах нафтогазового комплексу стали: корозійні пошкодження металу конструкції, брак будівельно-монтажних робіт, заводський брак матеріалів і обладнання, механічні пошкодження, порушення правил технології експлуатації та стихійні лиха.

Технічний стан металоконструкцій може бути охарактеризований: наявністю дефектів порушення суцільності матеріалу, невідповідністю геометричних параметрів конструкції нормованим, невідповідністю фізико-механічних характеристик нормативним значенням.

На стадії проектування й будівництва фізико-механічні характеристики (ФМХ) використовуваних конструкційних матеріалів є відомими априорі. При експериментальному визначенні залишкових напружень можна оцінити початковий ресурс міцності об'єкта. Причому, точність і вірогідність оцінки ресурсу об'єкта на стадії його спорудження не створює труднощів, оскільки існують передпускові випробування. Проте коли термін передбачуваного фізичного спрацювання металоконструкції закінчується, точність і вірогідність оцінки їх залишкового ресурсу стають дуже важливими. У цьому випадку незначна похибка у визначенні залишкового ресурсу може призвести до непередбачуваних змін властивостей матеріалу, тобто до його деградації. Тому фіксований термін, який залишився до руйнування експлуатованої конструкції, виявляється невідомим і часто занадто малі, щоб запобігти виникненню катастрофи.

## Актуальність проблеми

З наведеного видно, що питання контролю ФМХ матеріалів металоконструкцій є на даний час доволі актуальним, оскільки від нього залежить працездатність усіх об'єктів нафтогазового комплексу. За умовами вітчизняної промисловості, які сформувалися за останні десятиліття, основний акцент ставиться на одержанні достовірних результатів розрахунку залишкового ресурсу міцності. Дана проблема є складною у вирішенні для ланок неруйнівного контролю, тому що металоконструкції нафтога-

зового комплексу та інші об'єкти промисловості експлуатуються тривалий час при різних температурних режимах, навантаженнях і в агресивних середовищах.

Отже, в першу чергу необхідно знати фактичні фізико-механічні характеристики матеріалу, а також фактичний технічний стан металоконструкції, за якими можна аналізувати і прогнозувати надійну та безпечну експлуатацію досліджуваних об'єктів. Для реалізації поставленого питання необхідно проаналізувати всі можливі методи визначення фізико-механічних характеристик металу і з них виділити найбільш доцільні та економічно вигідні.

## Аналіз відомих методів контролю ФМХ металу

Методи контролю ФМХ металів поділяються за типами вимірюваних фізичних полів (рис. 1) і можуть бути руйнівними та неруйнівними.

До механічних методів контролю відносять різні види статичних та динамічних навантажень (метод вимірювання твердості, метод визначення дійсного опору розриву, метод визначення границі плинності та ін.). Механічні методи контролю відносяться до руйнівних і це є їх основним недоліком, оскільки потрібно порушувати цілісність конструкції, що не у кожному випадку є вигідно і економічно обґрунтовано. Але у порівнянні з неруйнівними методами руйнівні дають більш точну інформацію про стан досліджуваного об'єкта.

На практиці все частіше застосовують неруйнівні методи контролю. До них належать оптичні, радіохвильові, рентгенівські, акустичні, голографічні, капілярні, методи електричного опору, тензометричні, а також методи муару, сіток, фотопружності [1], які займають свої місця в п'яти ланках поділу методів за фізичними полями (рис. 1).

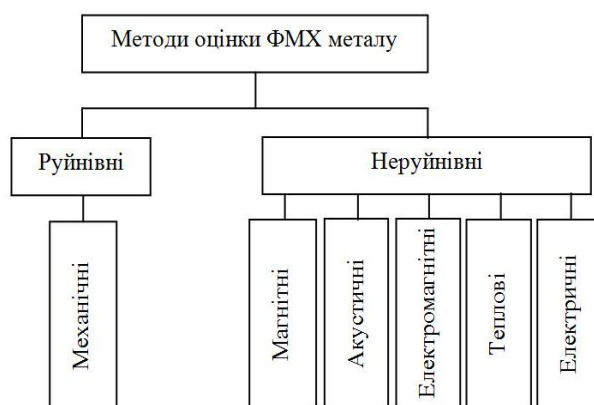


Рисунок 1 – Класифікація методів визначення ФМХ металів за типом фізичних полів

Загальна суть магнітних методів полягає у визначенні кореляції між магнітними та ФМХ феромагнітних матеріалів у тих випадках, коли фізичні та хімічні процеси утворення і перебування структури та фазового складу металу одночасно формують його магнітні властивості.

При магнітному контролі механічних характеристик та структури феромагнітних матеріалів використовують відносні вимірювання, тобто фіксується відповідність параметрів об'єкта контролю заданим. Щоб оцінити, наскільки при цьому механічні параметри деталі відрізняються від номінальних, потрібні їх доданкові зіставлення із параметрами спеціально підібраних зразків.

За останні десятиліття, впродовж яких проводилися певного роду дослідження, встановлена наявність закономірних зв'язків між структурним станом, хімічним та фазовим складом, механічними характеристиками матеріалів, з однієї сторони, і магнітними властивостями – з іншої.

Для визначення ФМХ феромагнітних матеріалів використовуються такі основні характеристики: намагніченість, магнітна індукція, магнітна проникність, параметри кривої гістерезису та ін.

Магнітні характеристики володіють різною структурною чутливістю і можуть бути використані як окремо (однопараметровий контроль), так і в сукупності (багатопараметровий контроль).

На даний час для вимірювання фізико-механічних характеристик найбільш ширшого використання набули наступні методи магнітного контролю (рис. 2).



Рисунок 2 – Магнітні методи контролю ФМХ феромагнітних матеріалів

За допомогою даних методів можна контролювати такі характеристики металів: твердість, величина зерна, товщина зміцненого шару, якість термообробки, ступінь пластичної деформації, вміст вуглецю, вміст феритної фази, хімічний склад, границя плинності та інші.

Проте, попри досягнуті успіхи в розроблянні методів та технічних засобів магнітного неруйнівного контролю ФМХ сталей, існує ряд обмежень теоретичного характеру, головне з яких полягає у неможливості встановлення аналітичних взаємозв'язків між досліджуваними ФМХ та вимірюваними параметрами [2].

**Коерцитиметричний метод.** Широке застосування коерцитиметричних методів контролю завдячує високій чутливості величини коерцитивної сили  $H_c$  до структурних змін і

фазових перетворень, достатній простоті і можливості проведення вимірювання в локальних ділянках виробів [3]. Проте навіть в тих випадках, коли із довідкової літератури відомий зв'язок коерцитивної сили із потрібним механічним параметром (твердістю, границею плинності [4], ударною в'язкістю [5], вмістом домішок і т.д.), необхідно встановлювати можливість його використання при коерцитиметричному контролі конкретних деталей в умовах виробництва.

Найбільш широко в структуроскопії використовується залежність між твердістю вуглецевих або низьколегованих сталей та їх коерцитивною силою (рис. 3) [2].

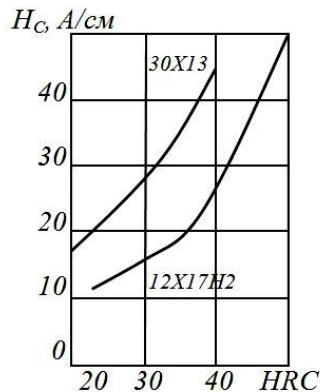


Рисунок 3 – Залежність коерцитивної сили окремих марок сталей від твердості

Також знайдені кореляційні залежності [6] для багатьох сталей між коерцитивною силою та прикладеним навантаженням в зоні пружності, причому значенню границі міцності відповідає певне значення коерцитивної сили. В області плинності і втрати міцності металу починається незворотна перебудова доменної структури. Зі збільшенням навантаження в області незворотних деформацій зростання  $H_c$  продовжується з формуванням нової доменної структури. Зміцнення металу на стадії передруйнування викликає остаточну перебудову доменної структури, збільшення коерцитивної сили до максимальних значень. Максимальні її значення відповідають границі міцності.

Значне поширення в даний час отримали коерцитиметри із приставним електромагнітом, які є зручними для застосування в виробничих умовах. Робота такого коерцитиметра базується на використанні кореляції між струмом розмагнічування, який є пропорційним коерцитивній силі, і певними механічними властивостями об'єкта контролю.

В даний час при розробці коерцитиметрів використовують нові технічні рішення, завдяки яким можна зменшити масу та габарити блока магнітних вимірювань, а також інструментальні похибки вимірювання коерцитивної сили. До таких технічних рішень можна віднести [7]:

– застосування в приладах суміщеної намагнічуючо-розмагнічуючої підсистеми з використанням як джерела розмагнічуючого поля котушки скомпенсованого типу з внутрішнім пазом (котушка Монтгомері);

– використання у ролі давача намагніченості об'єкта контролю ферозонда-градієнтметра з індивідуальним регулюванням просторової орієнтації кожного з його півелементів;

– безконтактне вимірювання струму в обмотці котушки розмагнічування за допомогою магнітного модулятора.

В результаті співпраці підприємства НПФ «СНР» (м. Харків) і ЗАТ НІІІІН МНПО «Спектр» розроблено серію приладів-структуроскопів, призначених для вимірювання величини коерцитивної сили. Базовим приладом серії є прилад КРМ-Ц. На його основі розроблено комплекс стаціонарних та мобільних приладів, забезпечених автономним джерелом живлення. Одним із останніх модифікацій таких приладів є структуроскоп КРМ-Ц-КЗ з вбудованим мікропроцесором. Також для вирішення задач структуроскопії широко використовують прилад «АММ». Принцип роботи приладу заснований на обчисленні коерцитивної сили, яка пропорційна струмові компенсації магнітного потоку залишкової магнітної індукції в замкненому магнітному колі, що складається з магнітопроводу і контрольованого матеріалу.

Цикл вимірювань коерцитивної сили приладом «АММ» включає такі етапи:

- магнітна підготовка;
- компенсація залишкової намагніченості;
- обчислення коерцитивної сили;
- індикація результатів виміру.

Сучасною модифікацією коерцитиметра з приставним електромагнітом є структуроскоп МФ-31КЦ. У даному приладі реалізовано автоматичне регулювання струму розмагнічування до значення, що відповідає розмагніченому стану об'єкта контролю.

Останнім часом при вимірюваннях властивостей основного металу та зварних з'єднань металокопунктур за допомогою коерцитиметрів застосовуються спеціальні комп'ютерні програми [8], призначені для систематизації, зберігання, візуалізації та оперативного використання результатів досліджень, які можна подати у будь-якому зручному вигляді.

Недоліком коерцитиметрів з приставними електромагнітами є залежність показів приладу від зміни зазору між полюсами електромагніта і поверхнею об'єкта контролю, а також від товщини сталюого об'єкта [9].

**Контроль за залишковою намагніченістю.** Використовується для сталей, у яких зв'язок залишкової індукції або намагніченості із механічними властивостями відомий [10]. Повністю намагнітити деталь великих розмірів доволі складно, тому часто намагнічують ділянку деталі із допомогою постійного магніту або електромагніту. Дуже ефективним в таких випадках є імпульсне намагнічування за допомогою соленоїда, яке використовується в імпульсних магнітних аналізаторах. Намагнічування в даному випадку здійснюється з допомогою малогабаритного соленоїда, який встановлюється перпендикулярно до поверхні об'єкта контролю.

При пропусканні імпульсу струму через соленоїд ділянка об'єкта контролю намагнічується неоднорідно, а після закінчення імпульсу намагніченість в кожній точці зменшується до певної залишкової намагніченості. Два ферозонди, ввімкнені за схемою градієнтметра, вимірюють різницю напруженостей магнітного поля в точках  $\Delta H$ . Вона характеризує механічні властивості матеріалу об'єкта контролю. На рисунку 4 показана залежність величини  $\Delta H$  від товщини об'єкта контролю.

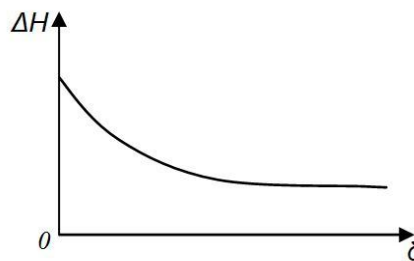


Рисунок 4 – Залежність градієнта напруженості магнітного поля від товщини металевих об'єктів

Для маловуглецевих сталей існує лінійний зв'язок між магнітними та механічними властивостями в інтервалі температур відпалу (600-750°C), тому магнітні аналізатори рекомендується використовувати для відбракування листового прокату, який пройшов недостатній відпал (при температурі меншій 550°C), а в інтервалі температур відпалу (600-750°C) – для визначення механічних характеристик за кореляцією між сигналом перетворювача і механічними властивостями.

Найбільш широке застосування знайшов прилад ИМА-4, який призначений для неруйнівного контролю механічних характеристик та структури листового прокату товщиною 0,15-4,0 мм. Намагнічування об'єкта контролю здійснюється послідовністю імпульсів (від 1 до 10), потім автоматично вимірюється градієнт магнітного поля, причому цикл «намагнічування-вимірювання» займає не більше 5 с.

При структурному аналізі різних металевих деталей також використовують прилади «Полус-1», ИМА-2А, ИМА-3, ТАМ-6 та ін..

Основними недоліками методу є можливість контролю тільки в локальних ділянках металокопунктурі і тільки на матеріалах із феромагнітними властивостями, а також досить високий рівень похибок вимірювання.

**Застосування ефекту Баркгаузена** (методу магнітних шумів) для структуроскопії феромагнітних матеріалів в даний час знаходиться на стадії розробки. Ефект стрибкоподібної зміни намагніченості спостерігається при збільшеному масштабі залежності  $B(H)$  (рис. 5). Стрибкоподібна зміна намагніченості, тобто виникнення магнітних шумів, відбувається як при змінах напруженості зовнішнього магнітного поля, так і при механічних навантаженнях.

При перемагнічуванні феромагнітного об'єкта змінним магнітним полем частотний

спектр індукції має як дискретні складові, що є кратними частоті, так і суцільну складову, яка має назву магнітного шуму.

Для реалізації методу магнітних шумів Баркгаузена використовують прилади, в яких інформативні параметри використовуються як інтенсивність магнітних шумів, тобто амплітуди складових спектру та ширина спектра.

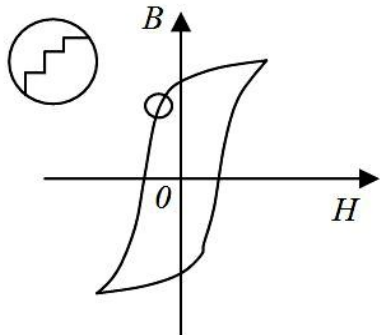


Рисунок 5 – Ілюстрація ефекту Баркгаузена

Першою установкою промислового застосування була ИБШ-2, що розроблена М. Міховські в Болгарії. Установа призначена для контролю структури і ступеня пластичної деформації тонких прутків. Відбракування здійснюється за рівнем магнітного шуму [11].

За результатом досліджень [12] можна стверджувати, що магнітошумова структуроскопія має хороші перспективи завдяки високій чутливості методу і можливості відлаштування від багатьох факторів завод.

Магнітне поле можна з достатньою точністю задати за допомогою електромагніта. В матеріалах, які мають додатну магнітну анізотропію (до них відносяться сталі), при стисненні металу інтенсивність шуму Баркгаузена знижується, а при розтязі – збільшується.

Саме цей ефект використовується в таких відомих приладах, як StressScan 500°C і PollScan-200. Час вимірювання в одній точці сягає 2 секунд, що є цілком прийнятним для практичного використання. Для контролю поверхневого зміцнення, ступеня дисперсності структури, а також вмісту немагнітної фази застосовують магнітошумовий аналізатор МАША-1.

Існує метод на основі ефекту Баркгаузена для вимірювання механічних напружень в трубопроводах, що працюють під тиском [13]. Згідно з даним методом на контрольному зразку реєструють параметри магнітних шумів і за їх значенням судять про напруження в трубопроводі. Суть досліджень полягає в тому, що вибирається контрольний взірець ділянки трубопроводу з нульовим значенням механічних напружень вздовж його поздовжньої осі, за яким розраховується коефіцієнт пропорційності за формулою:

$$K = \frac{P \cdot D}{(E - E_0) \cdot 2H}, \quad (1)$$

де:  $P$  – тиск в трубопроводі;  $D$  – зовнішній діаметр трубопроводу;  $H$  – товщина стінки тру-

бопроводу в місці контролю;  $E$  – значення параметра магнітного шуму, що створюється при перемагнічуванні металу впоперек його поздовжньої осі;  $E_0$  – нульове значення параметра магнітних шумів при заданому режимі роботи.

При цьому абсолютне значення механічного напруження в трубопроводі визначають із співвідношення:

$$\sigma = K(E_U - E_0), \quad (2)$$

де  $E_U$  – значення параметра магнітного шуму в металі трубопроводу в місці контролю при тому ж режимі роботи реєструючої апаратури.

Недоліком методу Баркгаузена є обмеженість його використання: зі всього ряду металів він використовується тільки на феритних матеріалах, які володіють високими магнітними властивостями.

**Магнітометричний метод (метод магнітної пам'яті металу)** є досить ефективним для визначення напружень в металі [14]. Він поєднує можливості неруйнівного контролю, механіки руйнування, матеріалознавства. Метод базується на використанні незворотних змін магнітного стану феромагнітних матеріалів у зоні концентрації напружень (КН) і деформацій, при яких відбувається спрямована та незворотна переорієнтація доменної структури магнітострікційної природи, що залишається і після зняття навантаження. Встановлено, що зміна залишкової намагніченості феромагнітних матеріалів пов'язана з максимально діючими напруженнями. В місцях локальної зміни намагніченості (в зонах КН) виникають магнітні поля розсіювання, які фіксуються відповідними приладами. Таким чином, одержуємо унікальну можливість без ретельної підготовки поверхні, проводячи поверхнею виробу (наприклад, ферозондом) та вимірюючи нормальну складову напруженості, знаходити зони пошкоджень, що розвиваються. Як правило, в цих зонах нормальна складова змінює знак, що свідчить про зміну внутрішньої структури металу.

Метод магнітної пам'яті металу використовують для вирішення задач напружено-деформованого стану конструкцій. З технічних засобів магнітного контролю привертає увагу магнітний мультитестер ММТ-2 [14]. Покладений в основу роботи приладу принцип вимірювання дозволяє визначити відносні значення магнітних властивостей контрольованих об'єктів в широкому діапазоні їх зміни.

Основним недоліком методу є вплив зовнішніх завод на результати вимірювань, а також низька достовірність результатів.

**Феритометрія.** Для визначення вмісту феритної фази безпосередньо в готових сталевих виробах застосовуються феритометри. Цей контроль важливий тому, що при надто великому вмісті феритної фази знижується пластичність сталей, а при механічних навантаженнях утворюються тріщини. Збільшення феритної фази знижує міцність зварних з'єднань. Оскільки

феритна фаза визначає магнітну проникність речовини, визначити її вплив можна, вимірюючи магнітну проникність. Змінний магнітний потік, який створюється збуджуючою котушкою, залежить від магнітного опору ділянки об'єкта контролю, який визначається вмістом феритної фази.

Із засобів вимірювання широко застосовують феритометр МФ-510. Він може використовуватися в лабораторних і цехових умовах у різних галузях промисловості. Також феритометр МФ-51НЦ призначений для вимірювання вмісту феритної фази в металі швів, наплавлених антикорозійних покриттях, заготовках, в деталях і готових виробах із корозійностійких нержавіючих хромонікелевих сталей аустенітного і аустенітноферитного класу. Для контролю вмісту феритної фази у зварних з'єднаннях використовується прилад МФ-10Ф. Принцип його дії базується на вимірюванні магнітної проникності феромагнітного зразка. Калібрування приладу проводиться на зразках. У даний час випускається феритометр МФ-50НЦ, призначений для вимірювання феритної фази у зварних з'єднаннях сталей аустенітного та аустенітно-феритного класів і розрахований на застосування в цехових і лабораторних умовах. Із закордонних приладів слід звернути увагу на портативний феритометр "Ferritoscope" фірми "H. Fischer" (Німеччина). Він використовується для вимірювання вмісту залишкового фериту аустенітного наплавлення у зварних з'єднаннях резервуарів, фланців і труб. Діапазон вимірювання феритної фази – до 80% [15].

Вагомими факторами в феритометрії є чутливість до зміни зазору та геометрія поверхні, які впливають на достовірність вимірювань.

**Метод намагніченості.** Цей метод базується на вимірюванні напруженості магнітного поля [16]. Для виявлення напруженості магнітних полів застосовують індукційну котушку і вимірюють перевищенні магнітні поля. При проведенні контролю в постійному колі для вимірювання потоку дослідний зразок (або індукційна котушка) повинні переміщуватися. Основною вимогою до вимірювання є підтримання швидкості руху незмінного потоку  $d\Phi/dt$  постійною. Цю вимогу не завжди вдається виконати, тому часто використовують ферозонди і зонди Холла. Також для вимірювання магнітного потоку останнім часом використовують електронні флюксметри. Вони автоматично реєструють концентрацію напруження, що виникає при проходженні зразка через вимірювальну котушку або при зміні намагнічуючого струму. Електронні флюксметри можна використовувати для автоматичного зняття петель гістерезису, вмонтовуючи їх у магнітні універсальні вимірювальні прилади. В якості контролюючого параметру в них використовують будь-яка величина напруження поля, в тому числі і залишкова намагніченість.

Для контролю ФМХ широко використовують магнітні структуроскоп МФ-31КЦ (контролююча деталь діаметром 6-18 мм і довжиною

5-70 мм), феромагнітний пристрій УФСТ-61 (контролююча деталь діаметром до 45 мм і довжиною до 120 мм).

Використання методу намагнічення обмежене, оскільки проведення контролю можливе тільки на деталях з обмеженими розмірами, також існує необхідність у підтриманні швидкості потоку незмінним.

**Акустичні методи контролю.** Акустичний контроль механічних характеристик сталей базується на встановлених взаємозв'язках між цими характеристиками (величина зерна, модуль пружності, твердість, текстурна міцність) та акустичними характеристиками металів.

До найважливіших інформативних параметрів акустичних методів контролю механічних характеристик матеріалів відносяться [17]:

- швидкість та час поширення ультразвуку;
- коефіцієнт затухань ультразвукових коливань;
- параметри акустичної емісії;
- характеристики взаємодії індентора з об'єктом контролю.

Відомо, що швидкість поширення ультразвуку в металах пов'язана з їх структурою і властивостями [18, 19]. Доведено, що монотонний характер зміни акустичних характеристик за зміною механічних характеристик може служити основою для організації промислового неруйнівного контролю механічних характеристик металів за швидкістю ультразвуку. Цей зв'язок базується на залежності механічних та акустичних властивостей від структурного стану металу [20].

Використання акустичних методів дозволило виявляти місця з пониженою механічною міцністю. Точність вимірювань досягає  $\pm 0.001\%$  при чутливості до  $10^{-7}$ . Так, наприклад, в роботі [21] вказано на можливість контролю твердості та ударної в'язкості за вимірними значеннями швидкості поширення ультразвуку на прикладі сталі 09Г2С.

Швидкість звуку може змінюватись через низку чинників: анізотропія характеристик сталі, в тому числі модулів пружності; деформація феритних та перлітних зерен при прокатці; неоднорідний розподіл домішок і різна густина в різних ділянках сталі.

Лінійний характер кореляційних залежностей між твердістю та швидкістю ультразвуку якісно можна оцінити функціональним зв'язком цих двох величин з пружними властивостями металу. Дійсно [18], швидкість ультра-

звукових коливань залежить від виразу  $\sqrt{\frac{G}{\rho}}$ , де

$G$  – модуль зсуву,  $\rho$  – густина. Більш точний якісний зв'язок між досліджуваними величинами поки не встановлений.

Існує також метод [22], що дозволяє виявляти області локальних змін структури та механічних характеристик металу протягнутих виробів шляхом вимірювання швидкості поверхневих (Релея) і підповерхневих (головних) акустичних хвиль.

Щоб позбутися впливу шорсткості поверхні на результати акустичних вимірювань при контролі твердості сталі, використано поздовжньо-поверхневі хвилі. Ці хвилі не розсіюються на нерівностях поверхні виробу, що дає змогу отримувати інформацію про якість металу підповерхневого шару.

Для практичної реалізації контролю механічних характеристик для певних марок сталей розроблено прилад ИСП-12, принцип якого базується на методі автоциркуляції імпульсу [24]. Відомий також акустичний метод для експрес-контролю розширеної номенклатури механічних характеристик конструкційних сталей [25]. Запропонований метод відноситься до методів дослідження внутрішньої будови матеріалу за допомогою ультразвуку. Згідно з даним методом виріб поміщають в рідину. При цьому приймають перший і другий пройдені імпульси повздовжньої хвилі, імпульс поперечної хвилі, що одноразово пройшов крізь матеріал, а також імпульс, що пройшов крізь рідину за відсутності об'єкта у вимірювальному тракті. За швидкістю поширення пружних хвиль в рідині та об'єкті визначають механічні характеристики матеріалу (модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона та модуль Юнга).

Не дивлячись на відносну простоту реалізації розглянутих методів та наявність відповідної апаратури, визначати значення механічних характеристик матеріалів за вимірними значеннями швидкості та часу поширення ультразвукової хвилі внаслідок незначної зміни цих акустичних характеристик із достатньою для практики точністю доволі складно.

Дуже часто на практиці, з метою оцінки переддефектного стану матеріалу та прогнозування розвитку сформованих дефектів, необхідна інформація щодо просторового розподілу механічних характеристик матеріалу. Необхідну для діагностики виробу інформацію про просторовий розподіл механічних характеристик матеріалу, в тому числі параметрів НДС, міцнісних (твердість, модуль Юнга та ін.), технологічних та інших характеристик, можна отримати за допомогою ультразвукової комп'ютерної томографії [26].

Для визначення міцнісних характеристик конструкційних матеріалів можна використовувати явище акустичної емісії (АЕ), тобто випромінювання матеріалом пружних хвиль, яке викликане динамічною локальною перебуваючою його внутрішньої структури [27].

Частотний спектр АЕ розподілений від області звукових частот до десятків та сотень мегагерц. Відомо, що пластичні та міцнісні характеристики матеріалу визначаються наявністю в ньому дислокацій. В залежності від напрямку обриву атомної площини дислокаціям приписують додатний або від'ємний знак. Їх взаємодія умовляється пружними напруженнями, викликаними кожною дислокацією. Прискорений рух, відрив чи анігіляція дислокацій викликають акустичні імпульси. Акустична емісія супроводжує весь процес деформування матеріалу:

від стадії руху і виходу на поверхню дислокацій до повного руйнування конструкції.

В роботі [28] встановлено, що поява неперервних сигналів АЕ свідчить про початок пластичного розтікання металів. Досліджені зразки виготовлені із сталей 30ХГНСА, Ст. 3, 12Х18Н10Т і титану ВТ1-0. Акустична емісія реєструвалась вимірювачем потужності слабких сигналів ИМ-1. Моментом появи АЕ вважався момент, коли сигнал, що реєструвався, перевищував рівень шумів на величину роздільної здатності приладу. Дослідження показали, що застосування методу акустичної емісії в якості індикатора залишкової деформації дозволяє визначати границю пружності матеріалів з допуском 0,0005%.

Практично всі види акустичних методів залежать від чистоти та шорсткості контрольованої поверхні, від однорідності матеріалу та від впливу зовнішніх температур. Тому для проведення акустичного контролю щораз необхідно переналаштовувати обладнання на спеціальних еталонних зразках, на що витрачається багато часу.

**Електромагнітні методи.** Визначення структурно-чутливих електричних і магнітних характеристик матеріалів або виробів за допомогою змінного магнітного поля складає основу електромагнітного, а саме вихорострумовевого контролю структури і властивостей матеріалів.

Даний метод базується на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з вихоривими струмами, що наводяться збуджуючою котушкою в електропровідному об'єкті контролю. В якості джерела електромагнітного поля найчастіше використовується одна або декілька індуктивних котушок (вихорострумівий перетворювач – ВСП). Синусоїдальний або імпульсний струм, що наводяться в котушках, створює електромагнітне поле, яке, в свою чергу, створює вихорові струми в досліджуваному об'єкті. Реєструючи напругу на котушках (трансформаторні ВСП) або їх опір (параметричні ВСП), отримують інформацію щодо властивостей об'єкта і положення ВСП відносно нього. Можливість такого контролю пов'язана із особливостями поведінки металів в змінних полях, перш за все із зміною його фази при проникненні в провідний матеріал і з неоднозначною залежністю магнітної проникності від напруженості поля.

В галузевому стандарті України ГСТУ 320.02829777.013-99 [29] вказується на доцільність визначення фізико-механічних характеристик сталей вихорострумівим методом контролю. Зокрема, пропонується використовувати спеціалізований прилад СІГМА-Т для контролю груп міцності та границі плинності сталей труб нафтогазового сортаменту, в тому числі бурового обладнання [30].

Перевагою вихорострумовевого методу є можливість проведення контролю без контактування перетворювача з досліджуваним об'єктом.

Для феромагнітних матеріалів і виробів величина вихорових струмів залежить від трьох

параметрів [31]: електропровідності, розмірів виробу та магнітної проникності. Водночас, магнітна проникність є також функцією напруженості поля намагнічування. Амплітудно-фазовий метод [32] базується на вимірюванні амплітуди і фази вторинної ЕРС. При контролі феромагнітних матеріалів існують підвищені вимоги до постійності розмірів виробу і рекомендується робота на низьких частотах поля, коли впливом вихорових струмів можна знехтувати і вважати, що магнітний потік розподілений вздовж перерізу виробу рівномірно. При цьому ефективна глибина проникнення вихорових струмів велика, і послаблення поля вихоровими струмами буде незначним. У вторинній ЕРС, яка виникає при намагнічуванні феромагнітного матеріалу синусоїдальним полем, з'являються вищі гармонічні складові. Їх використання дає змогу отримати додаткову інформацію.

Відомий цілий ряд приладів, які призначені для вимірювання питомої електричної провідності: ВЭ-26Н (НПО «Спектр», Москва), ВЭ-17НЦ/3, ВЭ-17НЦ/4, ВЭ-17НЦ/5 (Уральський електромеханічний завод, м. Єкатирибург) [33]. Також у вітчизняній промисловості для визначення хімічної чистоти електропровідних матеріалів, а також сортування напівфабрикатів і виробів за марками (хімічним складом) за твердістю та міцністю [16] найчастіше використовують вихорострумові структуроскопи ВС-10П, ЭМИД (ЭМИД-4М, ЭМИД-8). Згадані електромагнітні прилади мають короткі прохідні перетворювачі, які збуджуються від дії струму промислової мережі 50 Гц.

Найбільш цікавим із закордонних приладів є «Eddyvisor» фірми «ibg» (ФРН) [15], який з допомогою восьми програм, які вибираються оператором в діалоговому режимі, може контролювати твердість, глибину зміцненого шару, вміст вуглецю, механічні напруження та інші характеристики широкого спектру сплавів.

За кордоном великого поширення набули структуроскопи, розроблені в інституті доктора Ферстера. Прилад Magnetest використовують для сортування і неруйнівного контролю феромагнітних та не феромагнітних аустенітних матеріалів. Прилад Magnetest видає візуальне, графічне, точкове зображення отриманого сигналу і має електронно-сортувальне пристосування. Відомі прилади FM-140F (Magnaflux, США), Sigmatest 2.067 (F.Forster, ФРН) і Sigmascop SMP1 (H. Fischer, ФРН), які дозволяють вимірювати питому електричну провідність в діапазоні 0,1-60 МСм/м з похибкою до 2% [34-39].

Для виявлення зон підвищеного вмісту вуглецю, міді, кремнієвих ліквіацій залежно від складу сплаву та умов кристалізації використовують прилади типу ТЭП-10К (СРСР) та ТЕВОТЕСТ 3.205 (ФРН).

Основним недоліком методу є низька точність вимірювання, оскільки вихорові струми впливають тільки на поверхневий шар металу, який може бути в стані наклепу. Присутня також значна температурна і часова нестабіль-

ність, зумовлена використанням параметричних накладних вихорострумових перетворювачів. Ще одним вагомим чинником, від якого залежать покази приладу, що можна віднести до недоліків методу, є необхідність ретельної підготовки місця контролю, на що витрачається час.

**Тепловий контроль.** Тепловий метод неруйнівного контролю – це такий метод, при якому використовується тепла енергія, що поширюється в об'єкті контролю. Температурне поле поверхні об'єкта контролю є джерелом інформації про особливості процесу теплопередачі, які, в свою чергу, залежать від наявності внутрішніх чи зовнішніх дефектів [40].

Основним інформаційним параметром при тепловому неруйнівному контролі є локальна різниця температур між дефектною і бездефектною областями об'єкта контролю.

Безконтактні методи теплового контролю засновані на використанні інфрачервоного випромінювання нагрітого тіла. Інфрачервоне випромінювання займає широкий діапазон довжин хвиль – від 0,76 до 1000 мкм. Спектр, потужність і просторові характеристики цього випромінювання залежать від температури тіла і його випромінювальної здатності, обумовленої, в основному, матеріалом тіла і мікроструктурними характеристиками випромінюючої поверхні. Характер спектру випромінювання залежить в основному від агрегатного стану речовини.

Для характеризування теплового випромінювання зручним є поняття абсолютного чорного тіла (АЧТ), тобто тіла, що поглинає все падаюче на нього випромінювання. Випромінювання АЧТ описується аналітично, воно є функцією тільки його температури.

Розрізняють два види теплового контролю: активний і пасивний [16]. При активному контролі здійснюється нагрівання об'єкта зовнішнім джерелом енергії. Існують такі способи активного ТНК:

- короткочасне локальне нагрівання виробу з послідовною реєстрацією температури з тієї ж (при односторонньому контролі) або з протилежної сторони (двосторонній).

- з використанням скануючої системи, яка складається з міцно закріплених джерела нагрівання і реєструючого пристрою (наприклад радіометр), який переміщується з постійною швидкістю вздовж поверхні об'єкта НК.

- короткочасне локальне нагрівання поверхні об'єкта вздовж певної лінії з реєстрацією температури.

Метод пасивного теплового контролю полягає у аналізі теплових полів виробу з реєстрацією їх власного теплового випромінювання. До них відносять:

- вібротепловізійний метод, перспективний, насамперед, для аналізу виробів, що працюють в умовах вібрацій, від чого виникають температурні поля. Різного роду енергія розсіюється на дефектних ділянках і перетворюється на теплову за рахунок внутрішнього перегріву



в матеріалі. В областях порушення структури виникають локальні зони перегріву об'єкта. На термограмах вібруючих пластин і інших об'єктах чітко виявляються дефекти типу розшарувань та ін.;

– вихрострумолетепловий (ВСТ) метод заснований на радіоімпульсному збудженні металевих об'єктів полем індуктора та прийомі теплового відгуку приповерхневим перетворювачем в даний час, а також після теплової дії і подальшому аналізі амплітудно-тимчасової інформації. Хід теплового процесу визначається теплофізичними і одночасно електромагнітними параметрами об'єкта, що дає змогу в ході експерименту проводити одночасне дослідження як тепловими, так і вихрострумовими методами.

При скануванні об'єкта сфокусованим лазерним пучком (променем), переміщення якого синхронізовано з розгорткою ІЧ-камери тепловізора, можна реєструвати фазові термограми, тобто залежність від часу зміни температури в кожній точці показу даної термограми. Метод дозволяє істотно знизити вплив неоднорідності випромінюваної здатності поверхні об'єкта. Особливо ефективний цей метод для контролю тонких плівок, різних покриттів та інших об'єктів.

У методі фототермоакустики лазерне (оптичне) випромінювання проходить крізь оптичну систему і потрапляє на поверхню досліджуваного зразка. Під дією випромінювання тут створюються температурні і акустичні поля, за якими можна судити про структуру і параметри виробу. Поглинання лазерного імпульсу призводить до нестационарного підвищення температури поверхневого шару (за рахунок теплопровідності) як поглинаючого, так і прозорого середовища. При цьому відбувається збудження акустичних хвиль як в прозорому, так і в поглинаючому середовищі.

Тепловий контроль визначення фізико-механічних характеристик металів має ряд недоліків, серед яких основними є: негативний вплив на результати досліджень додатної температури зовнішнього середовища, сторонніх джерел тепла та світла, негативний вплив зовнішніх теплових полів, необхідність у постійному підлаштуванні коефіцієнтів випромінювання, висока вартість та низька достовірність даних.

**Електричний контроль.** Термоелектричний контроль знайшов широке застосування завдяки простоті конструкції і експлуатації термоелектричних приладів. Термоелектричний метод базується на ефектах, які пов'язані з термо-ЕРС в металах. На сьогодні відомо три ефекти, описані явищем термоелектрики [41]: ефект Томпсона, ефект Зеебека, ефект Пельтьє.

Даний вид контролю є одним із основних неруйнівних методів ідентифікації сталей і металів за марками [42]. Висока чутливість до змін хімічного і фазового складів [43], відносна простота та висока швидкість вимірювання забезпечує широке застосування цього методу

для розбракування сталей за марками [44], для експрес-аналізу сталі безпосередньо у ході плавлення і в злитках, для визначення товщини гальванічних покриттів, вимірювання глибини загартованого шару, дослідження процесів втоми металу та визначення їх механічних характеристик.

Джерелом інформації про фактичний фізичний стан матеріалу при термоелектричному контролі є термо-ЕРС, яка виникає в колі, що складається із пари електродів (гарячого та холодного) і об'єкта контролю. Обробка інформації може проводитися як за прямою, так і за диференціальною схемою.

На значення термо-ЕРС матеріалу при визначенні приналежності його до певної марки значний вплив мають такі фактори, як тиск та температурна стабільність гарячого електрода або різниця температур цього електрода та контрольованого об'єкта, стан їх поверхонь, хімічний склад. Вплив на загальну термо-ЕРС, яка виникає в місці контакту, здійснює як термо-ЕРС утвореної плівки, так і її опір протіканню струму.

Реєстрація результатів контролю можлива трьома способами: за індикацією нульового показу, за кутом відхилення стрілки індикаторного приладу, за зміною знаку термо-ЕРС.

На стабільність вимірювання термоЕРС в реальних виробничих умовах впливає тонкий молекулярний шар органічної змазки на місці проведення контролю з високим опором, що може знизити значення ЕРС на 30-70%. Результатом є низька точність вимірювання, тому методика сортування та інших термоелектричних випробувань вимагає ретельно-підготовленого місця контролю (знежирення та зачистка виробу), на що затрачається чимало часу. Ще одним важливим фактором, який впливає на ефективність термоелектричного сортування за марками, є структурний стан об'єктів контролю. Найбільш стабільні результати отримуються при сортуванні виробів, які пройшли відпал, що забезпечує відсутність внутрішніх напружень, або нормалізацію [16, 15].

Існує доволі стійка кореляція між структурним станом (фазовий склад, величина зерна, твердість), напруженнями в металі та термо-ЕРС. Термоелектричним методом можуть виявлятися зони підвищеного вмісту вуглецю, міді, кремнієвих лікваций в залежності від складу сплаву і умов кристалізації.

Значення термо-ЕРС і твердості залежать від вмісту вуглецю в твердому розчині. За вмістом вуглецю в цементованому шарі нижче евтектоїдного спостерігається однозначна залежність. Так, в роботі [45] досліджувалась залежність величини термо-ЕРС від різних легуючих компонентів, що входять до складу сталей. Встановлено, що термо-ЕРС більш чутлива до вмісту хрому і дещо менше до вмісту вуглецю. Це означає, що вироби із сталей, які відрізняються між собою за вмістом вуглецю, можуть бути надійно розсортовані.

Для вимірювання величини термо-ЕРС найбільшого практичного застосування знай-

шли прилади ТМС-МП [42], ТСП-16, ТЭП-ЮК і ПКММ-2.

Також відомі методи вимірювання питомого електричного опору матеріалів. Їх поділяють на контактні і безконтактні. [46].

До безконтактних відносять методи крутного магнітного поля та вихорострумівий. Метод крутного магнітного поля має низьку точність вимірювання (1%), до того ж даний метод неможливо застосувати до реальних конструкцій. Вихорострумівий контроль електропровідності обмежується переважно немагнітними матеріалами. Також глибина проникнення вихорових струмів є досить малою (до 1мм), тому отримана інформація стосуватиметься тільки підповерхневого шару об'єкта контролю.

До контактних відносять: метод одинарного моста, подвійного моста, потенціометричний, чотиризондовий, метод Ван-дер-Пау[46].

Мостові методи вимірювання електричного опору широко використовуються для вимірювання малих і великих опорів, які відрізняються на декілька порядків. Метод одинарного моста забезпечує задовільну точність при вимірюванні зрізків з відносно великим опором ( $>10$  Ом), тому він практично не використовується для вимірювання питомого опору сталей. За допомогою методу подвійного моста та потенціометричного методу можна з високою точністю вимірювати малі значення опору (від  $1 \cdot 10^{-6}$  до 1 Ом). Дані методи використовують, як правило, для визначення фазового складу металічних сплавів, зразки яких володіють низьким опором.

Метод Ван-дер-Пау [47] є однією з модифікацій чотиризондового методу, ним можна вимірювати питомий електричний опір зразків з довільною геометричною формою, проте його доволі складно реалізувати в технічному плані: він вимагає індивідуального розміщення зондів у залежності від форми зразка, що значно збільшує час контролю і ускладнює його проведення.

Чотиризондовий метод – метод вимірювання опору, при якому напруга визначається незалежно від сили струму. Метод використовує чотири електроди: два з яких під'єднанні до джерела живлення, а два інші до вольтметра з великим опором. Перевага методу в тому, що при визначенні напруги не враховується спад напруги на контактах, який може бути одного порядку із вимірюваним. Струм, який протікає через вольтметр, малий завдяки великому опору вольтметра, і, таким чином, похибка у визначенні напруги й струму зменшується. У випадку, коли контакти достатньо рознесені, необхідно враховувати геометричну поправку.

Вдалось знайти відомості щодо існуючих технічних засобів, які реалізують чотиризондовий метод, однак вони використовуються здебільшого для контролю питомого опору напівпровідників [47, 48], тонких металевих покриттів [49] або тонких металевих пластин [50]. При цьому математичне оброблення результатів вимірювань зводиться до розгляду об'єкта контролю малої товщини, або напівнескінчених

розмірів [51]. Відповідно геометричні функції поправок для цих крайніх випадків описуються різними залежностями, що обмежує застосування існуючих засобів на різних типорозмірах об'єкта контролю.

Практично всі методи вимірювання питомого електричного опору є обмеженими у використанні, оскільки їх застосовують переважно на виробках з невеликою товщиною. Вони є довготривалими і мають низьку точність вимірювання. Також дані методи вимагають хорошого контакту із контрольованою ділянкою, від чого залежать результати вимірювань.

**Радіаційний контроль.** Для визначення щільності структури матеріалів реєструється проникаюче і розсіяне іонізуюче випромінювання. В основі методу лежить процес послаблення іонізуючого випромінювання в ході просвічування виробу [16]. Можливості контролю виробів при наскрізному просвічуванні дуже обмежені, у зв'язку з необхідністю розташування джерела випромінювання і реєстратора (детектора) з двох сторін виробу. Крім того, велика кількість типів виробів мають тонкі стінки, в яких послаблення іонізуючого випромінювання буде надзвичайно малим. У таких випадках рекомендується використовувати розсіяне випромінювання, що виникає в результаті взаємодії з елементарними частинками матеріалу (електронами, мезонами та ін.) Теоретичний аналіз розсіяного випромінювання вказує на зв'язок між інтенсивністю розсіяного випромінювання з щільністю матеріалу. Причому для визначення щільності матеріалів перевага віддається  $\gamma$ -променям.

Існуючі радіаційні товщиноміри при відомій товщині забезпечують контроль щільності з похибкою  $\pm 5\%$ . Характер послідовності структурних змін за глибиною поверхневого шару деталі, а також за температурно-силовими умовами процесу динамічного контактного навантаження можна якісно оцінити шляхом рентгенографування. Для прецизійного визначення глибини зміненого шару необхідно одночасно з рентгенографуванням поверхонь всіх областей належних деталей провести пошаровий рентгеноструктурний аналіз однієї деталі. Рентгеноструктурний аналіз ґрунтується на принципі інтерференції рентгенівських променів при відбитті від кристалічної ґратки. Він реалізується дифрактометрами, апаратами типу УРС-50ІМ, апаратами серії ДРОН та ін.

Рентгенівська дифрактометрія є єдиним прямим методом неруйнівного контролю пружних деформацій кристалічної ґратки та визначення напружень, що не вимагають попередніх даних про стан матеріалу і його елементного і фазового складу. Вона уможлиблює визначення залишкових і діючих напружень в деталях і конструкціях різного призначення при їх виготовленні, експлуатації та ремонті. Рентгенівська дифрактометрія реалізується на практиці приладами: «КОМПАРАТОР», «БУЛЯ», РІКОР-2, РІКОР-3, РІКОР-4, РІКОР-5, РІКОР-6, розроблених компаніями ІРО і МІСіС. Рент-

генівський дифрактометр РІКОР-4 дозволяє послідовно визначати напруження в заданих напрямках, а також суму головних напружень в поверхневому шарі металу деталей і конструкцій.

Особливістю рентгенівського дифрактометра РІКОР-4 є колімаційний пристрій з полікапілярною напівлінзою Кумахова. Завдяки використанню полікапілярної оптики РІКОР-4 має ряд властивостей, які роблять його унікальним серед всіх існуючих подібних аналізаторів. Оптика дозволяє отримати практично паралельний в обох напрямках рентгенівський промінь високої інтенсивності (з розсіянням  $\sim 10^{-3}$  рад). Паралельність променя значно покращує точність визначення положення максимуму дифракційної лінії. Розмір рентгенівського пучка досить легко і зручно змінюється (до 5-6 мм). Широкий паралельний рентгенівський пучок супроводжується лазерним пучком наведення, що дозволяє швидко і з високою точністю розташувати зразок. Оскільки широкий пучок одразу аналізує велику поверхню зразку, це дає змогу скоротити час на виконання контролю.

Завдяки малій потужності рентгенівського джерела (рентгенівська трубка) не виникає проблем із захистом від радіації, а також немає потреби охолоджувати рентгенівську трубку, а це збільшує ресурс роботи приладу.

До основних недоліків радіаційного контролю відносять його високу вартість в порівнянні із іншими методами та небезпечний вплив радіаційного випромінювання на робочий персонал та навколишнє середовище.

### **Висновок**

Отже, для вирішення проблеми контролю ФМХ металів необхідно:

- розробити діагностичну модель металевої конструкції для оцінки ступеня безпеки дефектів, яка базуватиметься на найбільш прийнятних для практики методах неруйнівного контролю. Дана модель завдяки чітким діагностичним критеріям дасть змогу визначити на практиці ділянки металоконструкції, що перебувають у задовільному стані, у пошкодженому стані, а також обґрунтувати необхідність та доцільність ремонт пошкоджених ділянок;

- розробити технічні засоби вимірювань, які б давали змогу проводити контроль фактичного стану металевих конструкцій різного терміну експлуатації та з різними температурними режимами з високим ступенем достовірності;

- розробити відповідне нормативне забезпечення для проведення якісного обстеження металоконструкцій в нафтогазову комплексі інструментальними методами.

### **Література**

1 Доценко Є. Р. Контроль механічних характеристик конструкційних сталей за їх питомим електричним опором: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Доценко Євгеній Романович. – Івано-Франківськ, 2010. – 140 с. – Бібліогр.: с. 127–140.

2 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. – 130 с.

3 Бида Г.В. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук // Дефектоскопия. – 2000. – №10. – С. 3-28.

4 Бида Г.В. Магнитный контроль механических свойств проката / Г.В. Бида, Э.С. Горкунов, В.М. Шевнин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 250 с.

5 Бида Г.В. Физическое обоснование контроля ударной вязкости проката из малоуглеродистых и низколегированных сталей магнитными методами / Г.В. Бида, В.М. Камардин // Дефектоскопия. – 1995. – №10. – С. 3-31.

6 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.

7 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. – К.: ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України. – 2006. – С. 42.

8 Неклюдов І.М. Діагностичний контроль напружено-деформованого стану основного металу та зварних з'єднань трубопроводів енергоблоків за допомогою коерцитиметричного методу / І.М. Неклюдов, В.М. Ажажа, Л.С. Ожигов [та ін.] // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2004-2006 рр. – К.: ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України. – 2006. – С. 150.

9 Михеев М.Н. Зависимость показаний коэрцитиметра с приставным электромагнитом от параметров испытываемых изделий / М.Н. Михеев, И.А. Кузнецов, Т.П. Царькова // Дефектоскопия. – 1973. – №2. – С. 116-120.

10 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.

11 Велев Г.С. Автоматизированная система для комплексного неразрушающего контроля структуры и механических свойств материалов / Г.С. Велев, В.В. Латковски : XVII Российская научно-техническая конф. с междунар. участием «Неразрушающий контроль и диагностика». – Екатеринбург, 2005. – С. 258.

12 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.
- 13 Ботаки А.А. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов / А.А. Ботаки, В.В. Ульянов, А.В. Шарко. – М.: Машиностроение, 1983. – 74 с.
- 14 Дубов А. Исследование свойств металла с использованием метода магнитной памяти / А. Дубов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1997. – №9. – С. 35-39.
- 15 Неразрушающий контроль: практ. пос. / В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, В.В. Сухоруков; под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1992. – 312 с.
- 16 Белокур И.П. Дефектоскопия материалов и изделий / И.П. Белокур, В.А. Коваленко. – К.: Техника, 1989. – 192 с.
- 17 Шарко А.В. Современное состояние и перспективы развития акустических методов контроля прочностных свойств конструкционных материалов / А.В. Шарко // Дефектоскопия. – 1983. – № 5. – С. 72-87.
- 18 Крауткремер Й. Ультразвуковой контроль материалов: справочное издание / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
- 19 Муравьев В.В. Скорость звука и структура сталей и сплавов / В.В. Муравьев, Л.Б. Зуев, К.Л. Комаров. – Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.
- 20 Муравьев В.В. Взаимосвязь скорости ультразвука в сталях с режимами их термической обработки / В.В. Муравьев // Дефектоскопия. – 1989. – №2. – С. 66-68.
- 21 Полетика И.М. Об ультразвуковом контроле неоднородности механических свойств горячекатаной стали / И. Полетика, Н. Егорова, О. Куликова, Л. Зуев // Журнал технической физики. – 2001. – Т.71, Вып. 3. – С. 37-40.
- 22 Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов / М.Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1977. – 431 с.
- 23 Иванов А.И. Использование продольно-поверхностных волн при контроле твердости стали / А.И. Иванов, А.А. Лебедев, А.В. Шарко // Дефектоскопия. – 1990. – №2. – С. 89-91.
- 24 Лебедев А.А. Акустический контроль механических свойств стальных изделий поверхностными волнами Рэлея / А.А. Лебедев, А.В. Шарко // Дефектоскопия. – 1990. – №10. – С. 14-19.
- 25 Пат. 2224249 Россия, МПК G 01 N 29/18. Способ измерения физико-механических характеристик материала листового проката / Паврос А.С., Паврос С.К., Щукин А.В.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский гос. электротех. ун-т. – № 2002111891/28; заявл. 06.05.2002; опубл. 20.02.2004. – 6 с.: ил.
- 26 Кошовий В.В. Технології і засоби ультразвукової комп'ютерної томографії для неруйнівної оцінки об'ємної однорідності властивостей матеріалу в товстолистових конструкціях обладнання АЕС / В.В. Кошовий, О.Є. Левицький, А.Б. Лозинський, І.М. Романишин // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: [Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2004-2006 рр.] – К.: ІЕЗ ім.Є.О. Патона НАН України. – 2006. – С. 196-201.
- 27 Пенкин А. Г. 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 // Матеріали інтернет-сторінки. – Режим доступу: [www.sds.ru/articles/degradation/index.html](http://www.sds.ru/articles/degradation/index.html)
- 28 Дробот Ю.Б. Применение акустической эмиссии при определении предела упругости / Ю.Б. Дробот, В.В. Корчевский // IX Всесоюзная н/т конф. по неразрушающим методам контроля, Минск: тезисы докл. – Минск, 1981. – Ч. 2. – С. 173-174.
- 29 ГСТУ 320.02829777.013-99. Рекомендації по проведенню неруйнівного контролю бурового обладнання. – Івано-Франківськ.: НВФ «ЗОНД», 2000.
- 30 Криничний П.Я. Прилад для контролю фізико-механічних характеристик труб нафтового сортаменту СІГМА-5Т / П.Я. Криничний, І.А. Молодецький // Методи та прилади контролю якості. – 1998. – № 2. – С. 9-10.
- 31 Badidi Boudaa A. Grain size influence on ultrasonic velocities and attenuation / A. Badidi Boudaa, S. Lebailib, A. Benchaalaa // NDT&E International. – 2003. – Vol. 36. – P. 1-5.
- 32 Химченко Н.В. Ультразвуковой структурный анализ металлических материалов и изделий / Н.В. Химченко. – М.: Машиностроение, 1976. – 62 с.
- 33 "Энергосила": Измерители удельной электрической проводимости ВЭ-17НЦ/5 // Матеріали інтернет-сторінки. – Режим доступу: <http://inergo.ru/catalog/element.php?ID=25966>.
- 34 Дубов А.А. Диагностика котельных труб с использованием магнитной памяти металла / А.А. Дубов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 280 с.
- 35 Дорофеев А.Л. Индуктивная структурокопия / А.Л. Дорофеев. – М.: Энергия, 1973. – 96 с.
- 36 Ершов Р.Е. Контроль термообработки ферромагнитных изделий методом вихревых токов / Р.Е. Ершов // Изв. вузов. Физика. – 1966. – №4. – С. 52-61.
- 37 Правдин Л.С. Способ неразрушающего контроля механических свойств ферромагнитных изделий: авт. свид. № 552553 / Л.С. Правдин., А.С. Зельский. – Бюлл. изобр., 1977. – № 12 – С. 103.
- 38 Пат. RU 2051380 С1 РФ, МПК G 01 N 27/80. Способ магнитного контроля механических свойств ферромагнитных изделий / Сандомирский С. Г. – Опубл. 27.12.1995. – 6 с.
- 39 Пат. RU 2069361 С1 РФ, МПК G 01 N 27/72. Способ контроля механических свойств проката / Подгайский М.С., Следнев В.П., Дмитриев В.Д., Неустроев А.Л., Наливайченко Т.М., Савин В.А. – Опубл. 20.11.1996. – 5 с.
- 40 ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М.: Издательство стандартов, 1979. – 13 с.

- 41 Кузнецов И.А. Термоэлектрические датчики для контроля материалов и изделий без разрушений / И.А. Кузнецов // Дефектоскопия. – 1973. – №1. – С. 5-12.
- 42 Данилевин М.Н. Термоэлектрический прибор ТМС-МП для сортировки сталей по маркам / М.Н. Данилевин, В.С. Янковский // Дефектоскопия. – 1982. – №9. – С. 94-95.
- 43 Кузнецов И.А. Термоэлектрические свойства сталей и прибор для контроля химического и фазового состава / И.А. Кузнецов, В.М. Окунев // Дефектоскопия. – 1993. – №8. – С. 78-85.
- 44 Кашубский А.Н. Идентификация конструкционных материалов методами неразрушающего контроля физико-механических характеристик и структурных параметров: автореф. дис. 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.
- 45 Плотникова Г.А. О совмещении вихревого и термоэлектрического методов при сортировке сталей по маркам / Г.А. Плотникова // Дефектоскопия. – 1983. – №10. – С. 19-25.
- 46 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.
- 47 Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов: учеб. для вузов / Л.П. Павлов. – М.: Высш. шк., 1987. – 239 с.
- 48 Heaney Michael B. Electrical Conductivity and Electrical Conductivity and Resistivity / Michael B. Heaney // The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. – CRC Press LLC, 1999. – Chapter 43. – ISBN 084932145X.
- 49 Асанов М.В. Электротепловой метод раздельного контроля удельной электрической проводимости и толщины покрытий / М.В. Асанов, Ю.А. Плотников, А.Е. Пяташин, Л.А. Чернов // Дефектоскопия. – 1993. – №12. – С. 41-48.
- 50 Nahm S.H. Evaluation of fracture toughness of degraded Cr-Mo-V steel using electrical resistivity / S.H. Nahm., Y.I. Kim, K.M. Yu, A. Kim // Journal of Materials Science. – 2002. – V.37. – N16. – P.3549-3553.
- 51 Takeo F. Distinction of Alloy Steels by Means of the Closely Coupled Probes Potential Drop Technique / F. Takeo, M. Saka, T. Sagae // 15th World Conference on NDT, 15-21 October 2000, Rome. – Режим доступа: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn497/idn497.htm>

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*24.05.12*

*Рекомендована до друку професором*

***Б. В. Конесл***