

УДК 622. 691.4

DOI: 10.31471/2304-7399-2024-19(73)-207-214

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ НАФТОГАЗОПРОВІДІВ ТА РОЗРАХУНКУ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ

**Р. Т. Мартинюк**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
тел. 72-71-38; e-mail: snpr@iupq.edu.ua*

*Основний принцип діагностування металоконструкцій довготривалої експлуатації, та трубопроводів зокрема, ґрунтується на послідовних і систематичних вимірюваннях певних параметрів конструкції, на виявленні змін цих параметрів у процесі експлуатування і порівнянні їх з вихідними та на прогнозуванні зміни цих параметрів.*

*Для прийняття обґрунтованих рішень відносно терміну подальшого експлуатування трубопроводу, порядку та обсягів проведення ремонтних робіт, встановлення придатних термінів до найближчих діагностичних обстежень або експлуатаційного моніторингу параметрів, що є критичними, проводять оцінювання фактичного технічного стану трубопроводу, а за його результатами – розрахунок залишкового ресурсу. Розрахунок залишкового ресурсу полягає у перевірці виконання умови переходу конструкції (з дефектом чи без) у критичний стан за максимальних робочих параметрів навантажувань та врахування швидкості росту дефектів з плином часу (зміни розмірів дефекту), зміни механічних характеристик матеріалу. Розрахунковий залишковий ресурс визначається мінімальним проміжком часу від поточного стану до кінцевого, який відповідає руйнуванню конструкції.*

*Фізичні параметри поділяють на такі групи: кінематичні, геометричні, статичні, динамічні, теплові, акустичні, електричні та магнітні, механічні, атомно-фізичні, а також такі, що ґрунтуються на молекулярних властивостях матеріалів. Вимірювання фізичних параметрів покладено в основу різних методів і засобів технічної діагностики, за допомогою яких аналізують стан конструкції. Найбільш важливими у практиці технічного діагностування є параметри надійності та живучості металоконструкції, що знаходяться у функціональній залежності від виміряних значень, отриманих за проведення електрометрії вимірювання механічних властивостей, складу речовини, деформацій.*

**Ключові слова:** *діагностування, властивість матеріалів, віброакустика, аварійні ситуації, живучість металоконструкцій, фізичні параметри.*

### Актуальність теми

Ускладнення сучасної техніки, підвищення вимог до її надійності та неприпустимість виникнення аварійних ситуацій призводять до збільшення числа контрольованих структурних параметрів, а отже, необхідних вимірювальних засобів. Технічні засоби діагностування за характером використання можна умовно розділити на два класи: оперативні засоби та засоби діагностування, що застосовують при виготовленні, профілактичних оглядах, ремонтах, технологічних випробуваннях, передпускових випробуваннях. Ці засоби можуть бути як апаратними, так і програмними.

Сучасні підходи до оцінювання технічного стану трубопроводів довготривалої експлуатації і розрахунку залишкового ресурсу передбачають ведення історії експлуатування конструкції, вимірювання і моніторинг достатньо великої кількості діагностичних параметрів, передачу отриманих даних, їх оброблення та інтерпретацію.

Оцінювання фактичного технічного стану трубопроводів (рис.1) та прийняття рішень про їх подальше експлуатування здійснюють з допомогою двох підходів – розрахункового, на основі існуючих моделей механіки руйнування, та фізичного, коли вимірюють і оцінюють визначені параметри матеріалу, зокрема фізико-механічні характеристики



Рис. 1. Структурна схема оцінювання фактичного технічного стану трубопроводів

Перший підхід ґрунтується на принципах або лінійної механіки руйнування (ЛМР), або методик граничного переходу матеріалів, що деформуються, у нестійкий стан. Метод ЛМР дозволяє для різних класичних видів дефектів визначити критичні значення їх розмірів, тобто розмірів, які є нестійкими для заданої у розрахунках ситуації і повинні приводити до руйнування конструкції. До недоліків методу можна віднести відсутність чіткої теорії переходу від конфігурації реальної тріщини, виявленої у матеріалі металокопструкції, до тієї, яка покладена у основу розрахунків лінійної механіки руйнування; широкі діапазони зміни фізичних сталих, які входять у формули розрахунку, що приводить до суттєвих помилок у розрахунках. Так, наприклад величина коефіцієнта інтенсивності напружень може відрізнятись для одного і того ж матеріалу, випробуваного за однакових умов, у 2,4 рази у відношенні до свого найменшого значення [4].

Застосування методу ЛМР на практиці потребує попереднього виконання широкого об'єму підготовчих робіт і власне робіт з контролювання. Необхідно контролювати достатньо велику кількість параметрів, що входять у розрахункову модель, а потім за ними розраховувати початок руйнування.

Щодо другого підходу, то фактичні фізико-механічні характеристики матеріалу металокопструкцій довготривалої експлуатації визначають на взірцях-свідках або на взірцях, що вирізані з копструкції. Вирізати взірець з діючої металокопструкції економічно недоцільно. При виготовленні взірців із аварійних елементів металокопструкції виникає ряд запитань, зокрема чи відповідає ступінь пошкодження металу аварійної ділянки основному об'єму металу всієї копструкції, оскільки при виготовленні взірця пошкоджений метал може видалятись, що приведе до суперечливих результатів.

Існують спроби екстраполяції фізико-механічних характеристик зразків, отриманих за лабораторних випробувань, що імітують експлуатаційні, а також зразків, вирізаних із зруйнованої копструкції, на реальні, які знаходяться у роботі. Проте коректних кореляційних залежностей не отримано.

Тому, більш перспективним видається визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металокопструкції неруйнівними методами.

Існуючі методи неруйнівного контролю, які використовують на трубопроводах у процесі їх експлуатування, у залежності від фізичних принципів роботи класифікують таким чином (рис. 2.) [2].

Усі методи, перераховані на рисунку, мають ті чи інші суттєві недоліки, через які використання їх для реєстрації пошкоженості металу копструкції, що змінюється у процесі експлуатування, практично неможливо. До них відносяться: жорсткі вимоги до підготовки поверхні, складність та громіздкість апаратури, труднощі однозначної інтерпре-

тації отриманих результатів. Проте, основним недоліком є недостатня чутливість методів, і тому розмір дефектів, що виявляють, є для металоконструкцій близьким до критичного.

Для оцінювання фактичного стану металу трубопроводів позитивно себе зарекомендували електромагнітні методи неруйнівного контролю. Завдяки своїй специфіці – електрофізичні властивості металів на рівні кристалічної решітки пов'язані з механічними властивостями, пошкодженням структури, хімічним складом, режимами термообробки, пружними і пластичними деформаціями – електромагнітні методи дозволяють виявити не тільки розвинені дефекти, а також зони концентрації напружень і елементи конструкцій, у яких на рівні структури металу відбулися незворотні зміни. Тому кожна стадія процесу деформування-руйнування металу в умовах дії стискаючих і розтягуючих зусиль, температури може бути охарактеризована сукупністю електрофізичних параметрів, значення яких можуть бути виміряні. Таким чином, електромагнітні методи спрямовані не тільки на пошук розвинених дефектів, але і на здійснення ранньої діагностики, виявляючи ділянки об'єкта, найбільш схильні до пошкоджень.

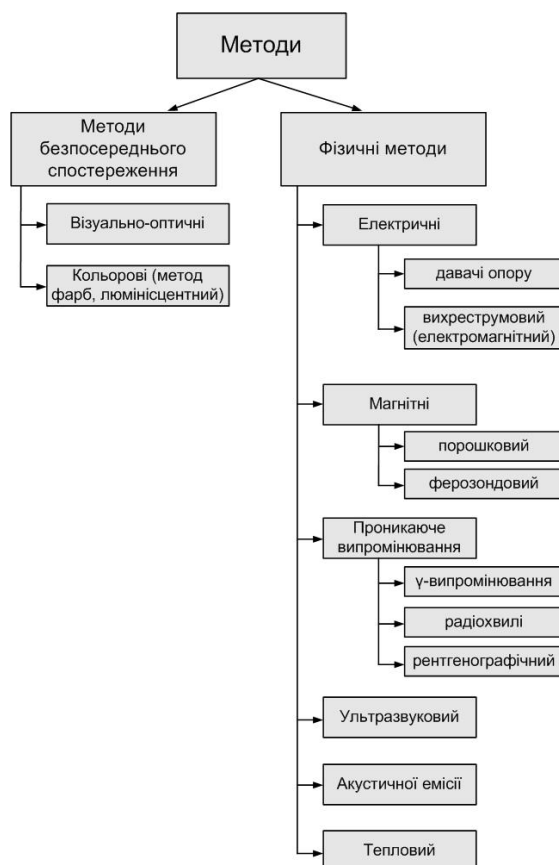


Рис. 2. Неруйнівні методи виявлення та спостереження за дефектами на трубопроводах

Процес накопичення пошкоджень досліджують комплексним методом, який включає в себе вихреструмний контроль, вимірювання мікротвердості та металографічний аналіз. Інформацію про накопичення пошкоджень отримують у процесі випробувань при виявленні екстремумів у співставленні параметрів вихреструмного контролю, мікротвердості та мікроструктури зразків. Однак застосування на практиці такого комплексного підходу потребує спеціальної підготовки поверхні та неперервного спостереження за об'єктом.

Оцінку рівня пошкоженості проводять методом акустичної емісії. Цей метод розроблений на достатньо високому рівні та використовується для обстеження конструкцій. Складність його застосування полягає у однозначному виділенні корисного сигналу, що відповідає розвитку дефекту, який в даних умовах експлуатації розвивається з найбільшою швидкістю і може привести до руйнування конструкції.

У багатьох роботах описані дослідження з визначення кореляційних залежностей між різними механічними і магнітними характеристиками феромагнітних сталей, при цьому магнітні характеристики визначались на основі аналізу електрорушійної сили (ЕРС) від шумів Баркгаузена (СБ). Експериментальна установка містила П-подібний електромагніт, що живився струмом низької частоти та вимірювальну котушку на феритовому сердечнику, сигнал з якої подавався на цифровий осцилограф з системою фільтрів. Відфільтровані сигнали ЕРС від ШБ після їх перетворення у цифровий вигляд аналізувались на комп'ютері. Дослідженню піддавались зразки з різною термообробкою. Після вимірювання характеристик сигналів ЕРС від ШБ зразки випробовувались руйнівними методами з метою визначення їх ударної в'язкості.

Числовому аналізу піддавались характерні пакети стохастичних імпульсів ЕРС від ШБ, отримані при перемагнічуванні досліджуваних зразків. При цьому кожному півперіоду перемагнічування відповідав один пакет таких імпульсів. Проінтегрувавши отримані пакети по намагнічуючому полю, отримали ряд часткових петель гістерезису, після аналізу яких відтворили криву початкового намагнічування. Провівши аналіз кривої початкового намагнічування. Отримали залежність диференціальної магнітної проникності від прикладеного магнітного поля [3].

Експерименти показали, що максимум диференціальної магнітної проникності пропорційний ударній в'язкості металу. При цьому кореляційна залежність максимуму диференціальної магнітної проникності від ударної в'язкості, у досліджуваному діапазоні, близька до лінійної. Крім того, значення намагнічуючого поля, що відповідає середині області Релея, прямо пропорційний межі міцності матеріалу.

Останнім часом великий інтерес представляють непрямі магнітні методи контролю напружено-деформованого стану трубопроводів, що ґрунтуються на кореляції магнітних і механічних параметрів металу.

Розроблені методи і технічні засоби вимірювання механічних напружень металу за магнітними діагностичними параметрами володіють рядом важливих для раннього діагностування напружено-деформованого стану елементів металоконструкції переваг. Це неруйнівна дія процесу контролю, висока продуктивність контролю у польових умовах, можливість дистанційного контролю з моніторингом напружено-деформованого стану металоконструкції у процесі експлуатування. Проте є й недоліки: однозначність показів індикаторів механічних напружень за магнітними шумами і магнітною анізотропією металу тільки в області пружної деформації металу і невизначеність показів в області його пластичної деформації; значна похибка (близько 30 %) визначення величини механічних напружень у металі за пружних та пружно-пластичних деформацій.

Контроль напружено-деформованого стану елементів металоконструкцій проводять із використанням технічних засобів для реєстрації магнітних шумів, магнітної анізотропії металу, коерцитивної сили та магнітної пам'яті металу.

Очевидно, що всі або навіть більшість факторів, що впливають на технічний стан трубопроводу, а отже і на його залишковий ресурс експлуатування, врахувати неможливо. Однак розширення кількості таких факторів буде сприяти підвищенню точності розрахунку залишкового ресурсу.

У більшості практичних розрахунків залишкового ресурсу трубопроводів застосовують підхід, що ґрунтується на оцінюванні зносу стінки за рахунок поверхневої корозії (загальної або локальної). У деяких випадках такий підхід є виправданим, проте у решті він є занадто спрощеним, оскільки у розрахунку враховують і використовують тільки один найбільш доступний фактор, який впливає на ресурс – корозійний знос [1]. Проте добре відомо, що у процесі експлуатування метал деградує, а ступінь деградування у кінцевому результаті визначає залишковий ресурс металоконструкції. Цей процес є багатофакторним і, зокрема, залежить не тільки від поверхневого корозійного зносу, але й від процесів, що погіршують тріщиностійкість металу, у тому числі зміни (погіршення) механічних характеристик.

Для розрахунку залишкового ресурсу, також, використовують комплексну методику аналізу безпеки, яка окрім оцінювання фактичного технічного стану, ще й врахування ризику експлуатування. Такий підхід ґрунтується на поєднанні існуючих методів оцінки фактичного технічного стану, які, в свою чергу, потребують доповнення, і методів аналізу ризику. Проведення ризик-аналізу дає змогу врахувати такі чинники, зокрема, як помилкові дії персоналу, зовнішні впливи природного і техногенного характеру, що не беруться до уваги в існуючих методиках розрахунку, але які, як свідчать статистичні дані, не рідко стають причиною виникнення аварії в межах розрахованого безпечного

терміну експлуатації металокопструкцій. Серед існуючих методів аналізу ризику у даній методиці рекомендовано використовувати метод дослідження небезпеки і пов'язаних з нею проблем (HAZOP-метод), аналіз видів і наслідків відмов (FMEA-метод), аналіз всіх можливих наслідків відмов і аварій системи (FTA-метод або метод «дерева відмов»), аналіз можливих наслідків події (ETA-метод або метод «дерева подій») та оцінювання впливу на надійність людського фактору (HRA-метод).

Ще одним із основних аспектів вирішення проблеми безпечного експлуатування трубопроводів, які відпрацювали значну частину проєктного ресурсу або вже вичерпали його, є удосконалення методик розрахунку залишкового ресурсу з урахуванням зміни механічних характеристик металу.

**Висновок.** Розраховуючи залишкову міцність трубопроводів, в основному використовують межу текучості та межу міцності, які і обмежують допустимі напруження. Разом з тим літературні дані свідчать, що показники міцності сталей можуть неоднозначно змінюватися після експлуатування від 10 до 30 років міцність або залишається незмінною. На завершальному етапі руйнування металокопструкції повинна передувати зміна механічних властивостей металу, які забезпечували її роботоздатність на початку експлуатування. Тому розрахунок залишкового ресурсу металокопструкції з використанням показників, які однозначно знижувалися би зі зростанням тривалості експлуатації і були б максимально чутливими до змін у металі, відкриє перспективу коректного прогнозування ресурсу таких відповідальних об'єктів, як металокопструкції довготривалої експлуатації [2].

#### *Література*

1. Цирульник О. Оцінювання роботоздатності сталі 17Г1С після тривалої експлуатації на газогоні / О. Цирульник, М. Греділь, О. Студент, [та ін.] // Вісник ТДТУ (механіка та матеріалознавство). – 2008. – Т. 13, №4. – С. 49-55.
2. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами: ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. – [Чинний від 2009 – 01 – 01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 88 с.
3. Тацакович Н.Л. Аналіз проблеми оцінювання зміни ударної в'язкості для розрахунку залишкового ресурсу металокопструкцій довготривалого експлуатування / Н.Л. Тацакович, О.М. Карпаш // Неруйнівний контроль та технічна діагностика: VI нац. наук.-тех. конф., Київ, 9-12 червня 2009 р.: тези доп. – Київ, 2009. – С. 290-291.
4. Механіка руйнування і міцність матеріалів у 10 т. / Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України; [Під ред. З.Т. Назарчука]. – Львів, 2001. (Серія «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»). Т. 5. – 2001 – 1134 с. – ISBN 978-966-02-5275-2.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 18.06.2024 р.*

---

**ANALYSIS OF METHODS AND MEANS OF DETERMINING  
THE ACTUAL TECHNICAL CONDITION OF OIL AND GAS  
PIPELINES AND CALCULATING THE RESIDUAL RESOURCE****R. T. Martyniuk**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;  
76019, Ivano-Frankivsk, str. Karpatska, 15; ph. 0342-72-71-38;  
e-mail: tzen@nunq.edu.ua*

*The main principle of diagnosing metal structures of long-term operation, and pipelines in particular, is based on consistent and systematic measurements of certain parameters of the structure, on detecting changes in these parameters during operation and comparing them with the original ones, and on forecasting changes in these parameters.*

*In order to make informed decisions regarding the term of further operation of the pipeline, the order and scope of repair works, the establishment of suitable terms for the nearest diagnostic examinations or operational monitoring of parameters that are critical, an assessment of the actual technical condition of the pipeline is carried out, and based on its results, the calculation of the residual resource. The calculation of the residual resource consists in checking the fulfillment of the condition of the transition of the structure (with or without a defect) to the critical state under the maximum operating parameters of loads and taking into account the rate of growth of defects over time (changes in the size of the defect), changes in the mechanical characteristics of the material. The calculation of the residual resource consists in checking the fulfillment of the condition of the transition of the structure (with or without a defect) to the critical state under the maximum operating parameters of loads and taking into account the rate of growth of defects over time (changes in the size of the defect), changes in the mechanical characteristics of the material. The estimated residual resource is determined by the minimum time interval from the current state to the final state, which corresponds to the destruction of the structure.*

*Physical parameters are divided into the following groups: kinematic, geometric, static, dynamic, thermal, acoustic, electric and magnetic, mechanical, atomic-physical, as well as those based on the molecular properties of materials. The measurement of physical parameters is the basis of various methods and means of technical diagnostics, which are used to analyze the state of the structure. The most important in the practice of technical diagnostics are the parameters of the reliability and survivability of the metal structure, which are functionally dependent on the measured values obtained by conducting electrometry, vibroacoustics, defectoscopy, structuroscopy, measurement of mechanical properties, substance composition, and deformations.*

**Keywords:** *diagnostics, properties of materials, vibroacoustics, emergency situations, durability of metal structures, physical parameters.*