

# ОГЛЯД ДЕЯКИХ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛУ СТВОЛІВ РАКЕТНИХ ТА АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СИСТЕМ

*Ігор Рибіцький, д.т.н., проф., Сергій Войтенко, к.т.н., доц., Олег Карпаш, д.т.н., проф.,  
Олександр Коваль, к.т.н., Віталій Запека  
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна  
e-mail: [rybitsky@gmail.com](mailto:rybitsky@gmail.com)*

## Анотація

Стволи ракетних та артилерійських систем за час інтенсивної експлуатації піддаються впливу високих температур, знакозмінних навантажень, корозійно агресивних середовищ. Ці впливи ведуть до швидкої деградації металу, зміни його структури, появи міжкристалічної корозії, мікротріщин та зміни фізико-механічних властивостей матеріалу в цілому. Сумарний вплив згаданих чинників призводить до нездатності конструкції витримувати робочі параметри та швидкого її руйнування. В таких конструкціях як стволи ракетних та артилерійських систем, цей процес є надзвичайно швидким і важко прогнозованим в часі. В статті подано аналіз основних методів неруйнівного контролю фізико-механічних характеристик сталей, проведено аналіз їх переваг та недоліків, описано сфери їх застосування. Проведені дослідження сучасного досвіду вимірювання фізико-механічних характеристик металоконструкцій показує, що існує певна недосконалість та обмеженість методу контролю характеристик металоконструкції за окремо взятими інформативними параметрами на основі окремо вибраного методу. Більш перспективним та тим, який найінтенсивніше розвивається на даний час є комплексний підхід до визначення фізико-механічних характеристик.

## Ключові слова

Вимірювання, методи неруйнівного контролю, фізико-механічні характеристики, технічний стан, металоконструкції, діагностична інформація, багатопараметрові задачі.

## 1. Вступ

В основі діагностування металоконструкцій, до яких також відносяться стволи ракетних та артилерійських систем, покладено принцип послідовного і систематичного вимірювання певних фізичних параметрів, виявлення змін цих параметрів у процесі експлуатування і порівняння їх з вихідними та прогнозування зміни цих параметрів [1].

Самі фізичні параметри діляться на такі групи: кінематичні, геометричні, статичні, динамічні, теплові, акустичні, електричні та магнітні, механічні, атомно-фізичні, а також такі, що ґрунтуються на молекулярних властивостях матеріалів.

В основу різних методів і засобів контролю технічного стану закладено вимірювання цих фізичних параметрів. Параметри надійності металоконструкції є одними з найбільш важливих у практиці технічного діагностування і вони є функційно залежні від вимірних значень, отриманих за проведення електрометрії, віброакустики, дефектоскопії, структуроскопії, вимірювання механічних властивостей, складу речовини, деформацій і т.д.

Засоби, що реалізують процедуру діагностування за характером використання, можна умовно розділити на оперативні та діагностування. Вони використовуються при виготовленні, профілактичних оглядах, ремонтах, технологічних випробуваннях, передпускових випробуваннях, безпосередньо в робочих умовах металоконструкції, тощо та можуть бути як апаратними, так і програмними [2].

Оцінювання технічного стану металоконструкцій і розрахунку залишкового ресурсу передбачають ведення історії їх експлуатування, вимірювання і моніторинг достатньо великої кількості діагностичних параметрів, передачу отриманих даних, їх оброблення та інтерпретацію, прийняття рішень про подальше експлуатування металоконструкції та здійснюють з допомогою розрахункового (врахування існуючих моделей механіки руйнування), та фізичного (вимірювання та оцінювання визначених параметрів матеріалу, зокрема фізико-механічні характеристики) підходів.

Розрахунковий (перший) підхід ґрунтується на принципах або лінійної механіки руйнування, або методик граничного переходу матеріалів, які зазнають деформації, у нестійкий стан. Метод лінійної механіки руйнувань 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. Недоліками цього методу є: відсутність чіткої теорії переходу від конфігурації реальної тріщини, виявленої у матеріалі металоконструкції, до тієї, яка покладена у основу розрахунків лінійної механіки руйнування; широкі діапазони зміни фізичних сталей, які входять у формули розрахунку, що приводить до суттєвих помилок у розрахунках.

На практиці застосування цього методу потребує попереднього виконання великого об'єму підготовчих робіт і після цього вимірювального контролю. При цьому вимірюванню підлягають достатньо велика кількість параметрів, що входять у розрахункову модель, а потім за їхніми значеннями розраховується момент початку руйнування.

При застосуванні другого підходу фактичні фізико-механічні характеристики матеріалу металоконструкцій довготривалої експлуатації визначають на взірцях-свідках або на взірцях, що вирізані безпосередньо з конструкції, що є зазвичай економічно недоцільно в першу чергу через необхідністю повного чи часткового руйнування конструкції. Можна виготовляти взірці з аварійних елементів металоконструкції, але при цьому виникає ряд запитань, зокрема на скільки відповідає ступінь пошкодження металу аварійної ділянки основному об'єму металу всієї конструкції, оскільки при виготовленні взірця пошкоджений метал може видалятися, що як правило приводить до неоднозначних результатів.

Є підходи, які базуються на спробах екстраполяції фізико-механічних характеристик зразків, отриманих за лабораторних випробувань, що імітують експлуатаційні, а також зразків, вирізаних із зруйнованої конструкції, на реальні, які знаходяться у роботі [3]. Проте релевантні кореляційні залежності при використанні цих підходів отримати важко.

## 2. Мета

Такі металоконструкції, як стволи ракетних та артилерійських систем, в процесі експлуатації зазнають значних знакозмінних навантажень, впливу високих температур, корозійно агресивних середовищ. Цей вплив призводить до деградування металу, зміни його структури, появи міжкристалічної корозії, мікротріщин та зміни фізико-механічних властивостей матеріалу в цілому. Сумарний вплив згаданих чинників безпосередньо впливає на залишковий ресурс металоконструкції, оскільки зміна фізико-механічних властивостей та об'єднання мікротріщин в макротріщини призводить до нездатності конструкції витримувати робочі параметри, що в подальшому найчастіше призводить до її руйнування. В таких конструкціях, як стволи ракетних та артилерійських систем, цей процес надзвичайно швидким і важко прогнозованим в часі. Тому виявлення змін фізико-механічних властивостей матеріалу та наявності мікротріщин на ранніх стадіях є надзвичайно актуальним з міркувань не тільки працездатності, але і безпеки експлуатації.

Метою даної роботи є проведення аналізу основних методів неруйнівного контролю, їх переваг та недоліків, сфер застосування та обґрунтування доцільності застосування тих, які найбільш придатні для вимірювання фізико-механічних характеристик сталей, з яких виготовляються стволи артилерійських та ракетних систем.

## 3. Огляд методів

На даний час найбільш перспективним є діагностування фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкції неруйнівними методами. Найбільш поширені на сьогодні методи неруйнівного контролю, які використовуються для контролю фізико-механічних характеристик металоконструкцій у процесі їх експлуатування, у залежності від фізичних принципів роботи подано на Рис. 1 [4].



Рис. 1. Методи неруйнівного контролю фізико-механічних характеристик металоконструкцій

В назві кожного з методів закладено фізичне явище, на основі якого реалізовується конкретний метод контролю. Зокрема, акустичний метод ґрунтується на застосуванні пружних коливань, які збуджуються чи виникають в об'єкті контролю. В основу вихрострумового покладено на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, які наводяться в об'єкті цим полем [5].

Радіохвильовий метод базується на аналізі взаємодії електромагнітного випромінювання радіохвильового діапазону з об'єктом контролю. Суть радіаційного метода полягає в аналізі іонізуючого випромінювання після взаємодії з об'єктом контролю [6]. Електричний метод ґрунтується на реєстрації параметрів електричного поля, яке взаємодіє з об'єктом контролю чи виникає в об'єкті контролю внаслідок зовнішнього впливу. Тепловий ґрунтується на реєстрації температурних полів об'єкта контролю. Оптичний ґрунтується на аналізі взаємодії оптичного випромінювання з контрольованим об'єктом. Візуальним методом називається органолептичний контроль, що здійснюється органами зору людини [7]. Застосування магнітного методу ґрунтується на реєстрації магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектами, або на визначенні магнітних властивостей об'єкта контролю. Контроль проникаючими речовинами базується на властивостях речовин проникати у порожнини дефектів об'єкта контролю.

Перелічені методи в залежності від методик їх застосування, дозволяють отримати ті чи інші інформативні параметри, наприклад швидкість поширення випромінювання, величина його затухання, питомий електричний опір, коерцитивна сила та інші. Вони дозволяють оцінити цільові параметри технічного стану металоконструкції, зокрема дійсні фізико-механічні характеристики, наявність (відсутність) чи розмір дефектів типу тріщин, залишкова товщина. Одна із задач технічної діагностики, яка також може бути вирішена при цьому, це є можливість перейти від цільових параметрів технічного стану з достатньою точністю та достовірністю, до визначення ступеня їх зміни (деградації) з метою оцінки залишкового ресурсу, оцінки ризиків тощо. Проте кожен з наведених методів володіє як своїми перевагами, так і недоліками. Коротко розглянемо основні з них, які найчастіше застосовуються для неруйнівного контролю фізико-механічних характеристик металоконструкцій.

На даний час значного розвитку набули електромагнітні методи неруйнівного контролю для оцінювання фактичного стану металу. Специфіка їх полягає в тому, що електрофізичні властивості металів на рівні кристалічної решітки пов'язані з механічними властивостями, пошкодженням структури, хімічним складом, режимами термообробки, пружними і пластичними деформаціями. Тому 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 [8].

Визначення структурно-чутливих електричних і магнітних характеристик матеріалів або виробів за допомогою змінного магнітного поля складає основу вихреструмового контролю структури і властивостей матеріалів. 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.

Для феромагнітних матеріалів і виробів величина вихрових струмів залежить від трьох параметрів [9]: електропровідності, розмірів виробу та магнітної проникності. Разом з тим, магнітна проникність є також функцією напруженості поля намагнічування. Амплітудно-фазовий метод базується на вимірюванні амплітуди і фази вторинної електрорушійної сили. При контролі феромагнітних матеріалів існують підвищені вимоги до постійності розмірів виробу і рекомендується робота на низьких частотах електромагнітного поля, коли впливом вихрових струмів можна знехтувати і рахувати, що магнітний потік розподілений по виробу рівномірно. При цьому ефективна глибина проникнення вихрових струмів є великою і послаблення поля буде незначним. У вторинній електрорушійній силі, яка виникає при намагнічуванні феромагнітного матеріалу синусоїдальним полем, з'являються вищі гармонійні складові [10]. Їх використання дозволяє отримати додаткову інформацію. (Рис. 2).

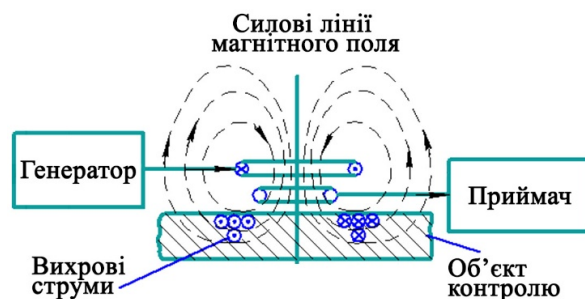


Рис. 2. Схема контролю електропровідності вихреструмовим методом

Для вимірювання фізико-механічних характеристик феромагнітних матеріалів також широко застосовується магнітні методи неруйнівного контролю. За характером взаємодії фізичного поля з об'єктом контролю цей метод не диференціюють. У всіх випадках проводять намагнічування об'єкта і вимірюють параметри, що використовують під час контролю магнітними методами. Тому операція намагнічування для даного виду контролю є обов'язковою. В залежності від конкретних задач неруйнівного контролю, марки контрольованого матеріалу можуть використовуватися ті чи інші первинні інформативні параметри [11]. До найбільш

поширених відносяться наступні інформативні параметри: коерцитивна сила, намагніченість, індукція (залишкова індукція), магнітна проникність, напруженість, ефект Баркгаузена.

На даний час також широко застосовуються непрямі магнітні методи контролю напружено-деформованого стану трубоподібних металоконструкцій, що ґрунтуються на кореляції магнітних і механічних параметрів металу. Перевагою їх є неруйнівна дія, висока продуктивність особливо у польових умовах, безконтактність контролю з можливістю моніторингу напружено-деформованого стану металоконструкції у процесі експлуатації. Недоліком є значний вплив магнітної анізотропії на кінцевий результат.

Кореляція між магнітними та фізико-механічними характеристиками феромагнітних матеріалів виникає в тих випадках коли фізичні та хімічні процеси утворення та перебудови структури і фазового складу металу одночасно формують його магнітні властивості [12].

Складний характер одночасного впливу різних факторів на магнітні та фізико-механічні властивості феромагнітних матеріалів часто не дозволяють визначити вплив кожного фактора окремо. Тому в магнітній структуроскопії оцінюють зміну магнітних параметрів і по ним визначають різні фізико-механічні властивості об'єктів, які їм відповідають. При магнітному контролі механічних характеристик та структури феромагнітних матеріалів використовують відносні вимірювання, тобто не вимірюють якийсь магнітний або механічний параметр, а тільки фіксують чи відповідають параметри об'єкта контролю заданим параметрам чи відхиляються від них. Щоб оцінити, наскільки при цьому механічні параметри деталі відрізняються від номінальних, потрібні додаткові співставлення із параметрами спеціально підібраних зразків.

Інший метод, який також можна застосовувати для діагностування стану стволів ракетних та артилерійських систем, базується на кореляційних залежностях між різними механічними і магнітними характеристиками феромагнітних сталей, при цьому магнітні характеристики визначались на основі аналізу електрорушійної сили від шумів Баркгаузена (Рис. 3). Ефект стрибкоподібної зміни намагніченості спостерігається при збільшеному масштабі залежності намагнічування феромагнітних матеріалів [13]. Виникнення магнітних шумів, або стрибкоподібна зміна намагніченості, проходить як при змінах напруженості зовнішнього магнітного поля, так і при механічних навантаженнях.

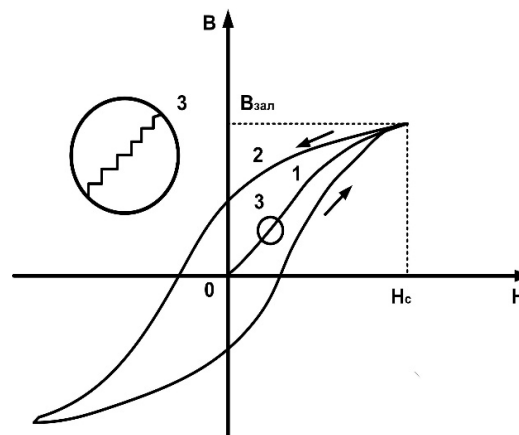


Рис. 3. Криві намагнічування феромагнітних матеріалів: 1 - основна крива намагнічування, 2 - петля гістерезису, 3 - стрибкоподібний характер намагнічування, який спостерігають під час точного вимірювання (ефект Баркгаузена)

При перемагнічуванні феромагнітного об'єкта змінним магнітним полем частотний спектр індукції має як дискретні складові, які є кратними частоті, так і суцільну складову, яка носить назву магнітного шуму. Дослідження показують, що магнітошумова структуроскопія має хороші перспективи завдяки високій чутливості методу і можливості відлаштування від впливу багатьох факторів завад. Параметри магнітного поля 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. На основі ефекта Баркгаузена на даний час також розвивається метод вимірювання механічних напружень в трубоподібних металічних конструкціях, які працюють під тиском.

На даний час накопичений значний експериментальний матеріал по кореляції магнітних властивостей сталей різних марок із їхніми фізико-хімічними та механічними властивостями. Магнітний метод контролю застосовується для визначення: фізичної та умовної границі текучості, 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 безвуглецевого шару, відносної деформації, загину.

Застосування акустичних засобів контролю фізико-механічних характеристик та структури матеріалів (величина зерна, модуль пружності, твердість, текстура, міцність і т.д.) базується на зв'язку цих характеристик із акустичними характеристиками матеріалів (швидкість поширення хвиль, коефіцієнт затухання пружних хвиль, характеристичний імпеданс і т.д.) [14].

Сучасні акустичні методи дають змогу досліджувати стан матеріалу за швидкістю і часом поширення поздовжніх, поперечних та поверхневих хвиль, за вимірними значеннями частот власних коливань виробів, проводити структурні дослідження за даними вимірювання коефіцієнта затухання [15], з використанням методів акустичної спектроскопії, оцінювати механічні властивості за результатами фізичних процесів в інденторі, прогнозувати зміну напруженого стану об'єктів методами акустичної емісії.

Також методами акустичної емісії можна здійснювати оцінку рівня пошкодженості. Ці методи станом на сьогодні розроблені на достатньо високому рівні. Перебудова структури матеріалу, яка викликається рухом груп дислокацій, виникненням і розвитком тріщин, алотропічними перетвореннями в кристалічних ґратах, супроводжується появою пружних хвиль ультразвукового (рідше звукового) діапазону [16]. На використанні цих хвиль заснований метод акустичної емісії.

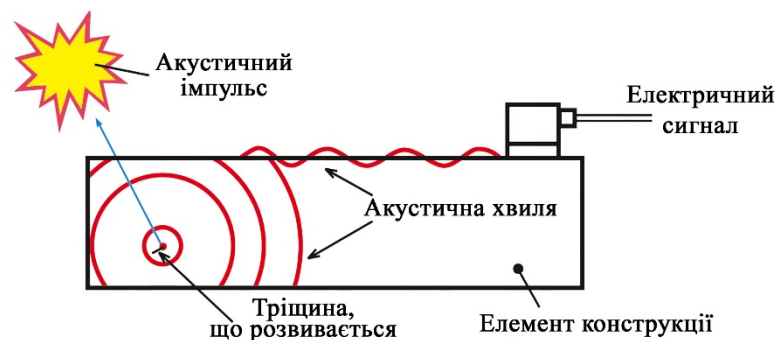


Рис. 2. Схема контролю акустичною емісією

Використовуючи такі інформативні параметри, як кількість сигналів в одиницю часу, їх частота, амплітудний розподіл, локація місця виникнення пружних хвиль, судять про стан матеріалу, змінах, що відбуваються в ньому, прогнозують працездатність конструкції.

Перевагою методу акустичної емісії є можливість виявлення мікротріщин на стадії зародження, проте складність його застосування полягає у однозначному виділенні корисного сигналу, що відповідає розвитку дефекту, який в певних умовах експлуатації розвивається з найбільшою швидкістю і може привести до руйнування конструкції.

На сьогоднішній день в напрямку удосконалення акустичних методів контролю проводиться ряд досліджень спрямованих на відділення від шумів, які виникають через відбиття пружних хвиль від структурних неоднорідностей, наприклад, границь кристалів у полікристалічному матеріалі [17]. Застосовуються специфічні типи пружних хвиль у твердому тілі: поверхневих хвиль, хвиль у пластинах і стержнях. Це значно збільшує межі можливого застосування методу. Розробка засобів високоточного вимірювання швидкості поширення ультразвукових коливань відкриває можливості вимірювання внутрішніх напружень у твердих тілах за зміною швидкості чи загасання.

Також ведуться роботи з розроблення нових способів оброблення отриманої інформації, де дуже перспективною є обчислювальна ультразвукова голографія. Наприклад, використовуючи спеціальні п'єзоперетворювачі, сканують велику ділянку (порядку 200x200 мм) поверхні об'єкта контролю. Одержана при цьому інформація обробляється за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення, яке використовує ті ж алгоритми, що реалізуються в оптичній голографії при накладенні світлового випромінювання. Завдяки цьому вдається значно точніше представити форму і розміри дефектів, що виявляються, і більш обґрунтовано судити про їхній вплив на працездатність виробу.

Термоелектричний контроль знайшов широке застосування завдяки простоті конструкції і експлуатації приладів, що реалізують даний метод вимірювання. На значення термо-електрорушійної сили матеріалу при визначенні належності його до певної марки значно впливають такі фактори, як тиск та температурна стабільність гарячого електрода або різниця температур цього електрода та контрольованого об'єкта, стан їх поверхонь, хімічний склад і т.д. Вплив на загальну термо-електрорушійну силу в місці контакту чинить як термо-електрорушійна сила утвореної плівки, так і її опір протіканню струму.

На стабільність вимірювань термо-електрорушійної сили в реальних виробничих умовах впливає тонкий молекулярний шар органічного мастила на контрольованій поверхні із високим питомим опором, що може знизити значення термо-електрорушійної сили на 30-70%.

Ще одним важливим фактором, який впливає на ефективність термоелектричного сортування по марках, є структурний стан об'єктів контролю [18]. Найбільш стабільні результати отримуються при сортуванні виробів, які пройшли відпал, що забезпечує відсутність внутрішніх напружень, або нормалізацію. Це важливо також

при вхідному контролі та сортуванні металевих заготовок, з яких зокрема і виготовляються стволи ракетних та артилерійських систем. Вхідний контроль та сортування дозволяють значно знизити кількість дефектних виробів на виході, знизити витрати на виробництво та підвищити якість виробів.

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

Значення термо-електрорушійної сили і твердості прямо залежать від вмісту вуглецю в твердому розчині. При вмісті вуглецю в цементованому шарі нижче евтектоїдного спостерігається однозначна залежність від нього значень термо-електрорушійної сили, а при рівному чи більшому вмісті – така залежність відсутня.

#### **4. Обґрунтування методу**

Кожен з згаданих методів контролю володіє своїми перевагами та недоліками, можливостями застосування та обмеженнями, швидкістю та точністю. Тому для розроблення надійної та точної системи контролю технічного стану стволів ракетних та артилерійських систем необхідно розробити комплексний метод з набором оптимальної кількості інформативних параметрів, який би максимально використовував переваги та мав мінімальний вплив на кінцевий результат недоліків кожного з методів [18].

Під час вибору методів неруйнівного контролю важливе значення мають наступні характеристики: чутливість і розрізняльна здатність; достовірність результатів контролю; надійність апаратури; простота технологій проведення контролю; продуктивність контролю; вимоги до техніки безпеки; вимоги до кваліфікації фахівців, які здійснюють контроль.

Також вибір методу контролю необхідно проводити з урахуванням таких чинників: фізико-механічних характеристики виробу, які можуть бути виміряні; тип дефекту, його розміри та місце розташування в контрольованому виробі; умови роботи виробу і вимоги технічних умов чи іншого нормативного документа на відбракований виріб; матеріал, з якого виготовлений виріб; стан і чистота оброблення поверхні; форма і розмір виробу; доступність виробу; умови контролю.

Вищенаведене, та аналіз робіт інших дослідників з даного питання показали, недосконалість та обмеженість контролю фізико-механічних характеристик металоконструкції за окремими інформативними параметрами на основі окремо вибраного методу. Це пов'язано в основному з певними особливостями, які необхідно обов'язково враховувати, зокрема:

- нелінійність зв'язку між інформативними параметрами та цільовими характеристиками, різна точність значень інформативних параметрів і цільових характеристик, що є критичним для розрахунку та прогнозування залишкового ресурсу;
- якщо розглядати комплекс інформативних параметрів, то потрібно враховувати той факт, що вони можуть мати взаємну кореляцію;
- не можливість отримання аналітичного (у вигляді формули) зв'язку між інформативними параметрами та цільовими характеристиками;
- для конкретних завдань технічної діагностики потрібно розробляти свою методологію підбору комплексу інформативних параметрів.

Постійне ускладнення сучасних технічних систем, зростання вимог до їх надійності та прагнення уникнення аварійних ситуацій призводять до збільшення числа структурних параметрів, що контролюються та удосконалення самих вимірювальних засобів [2].

#### **5. Висновки**

На даний час питання комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик в наукових колах обговорюється все частіше. Складність полягає в основному в тому, що для кожної групи сталей потрібно підібрати свій унікальний набір методів та засобів, що забезпечить комплексний підхід та дозволить підвищити точність, швидкість та інформативність. Проте окремі дослідження показують, що навіть в межах однієї групи сталей, комплексний набір параметрів який показує гарні результати на одній сталі, зовсім не придатний для іншої сталі.

Особливого інтересу викликають методи, які базуються на інформативних параметрах, що використовують різні типи фізичних полів (магнітних, електричних, теплових, акустичних, тощо).

Тому, для розроблення нового методу багатопараметрового контролю фізико-механічних характеристик сталей стволів ракетних та артилерійських систем, подальші зусилля потрібно спрямувати на вирішення двох основних завдань: вибір оптимального набору параметрів контролю (мінімальна кількість параметрів, що дасть максимум діагностичної інформації) та розроблення (або вибір з наявних) відповідних вимірювальних засобів.

При цьому реалізація даного підходу вимагатиме застосування сучасних способів вирішення багатопараметрових задач.

## Конфлікт інтересів

The authors state that there are no financial or other potential conflicts regarding this work.

## Посилання

- [1] Bolzon Gabriella. *Non-destructive mechanical testing of pipelines*. Lecture Notes in Civil Engineering. Book Chapter. 2021. ISBN 978-3-030-58072-8. DOI: 10.1007/978-3-030-58073-5\_1.
- [2] I.V. Rybitskyi, O.M. Karpash, V.Yu. Zapeka, P.M. Reiter, A.V. Yavorskyi, N.I. Chaban. "Substantiation of new diagnostic parameters of pipeline systems efficiency". The Paton Welding Journal, 2025, #4, 47-51 pages. <https://doi.org/10.37434/tpwj2025.04.07>.
- [3] Yukhymets, P.S., Dmytrienco, R.I., Palienko, O.L., Yehorenko, V.M. "Mechanical properties of metal of critically thinned sections of the heat pipelines and features of their destruction". Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol, 4, 2022, 34-46 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.04.06>.
- [4] EN 1330-2:2001. Non destructive testing - Terminology - Part 2: "Terms common to the non-destructive testing methods".
- [5] EN 1330-5:2000 - Non-destructive testing - Terminology - Part 5: "Terms used in Eddy current testing".
- [6] EN 1330-3:2000 - Non-destructive testing - Terminology - Part 3: "Terms used in industrial radiographic testing".
- [7] EN 1330-10:2004 - Non-destructive testing - Terminology - Part 10: "Terms used in visual testing".
- [8] Uchanin, V.M. "Surface EDDY current probes of double differential type as an effective tool to solve non-destructive inspection problems". The Paton Welding J., 2, 46-55. <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.02.07>
- [9] R.M. Solomakha, V.G. Rybachuk, V.M. Uchanin. "Distribution of effective coercive force of composite samples at its measurement by attachable magnetic transducers". Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing. #3, 2023, pp. 3-9. <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.03.01>.
- [10] Zhou, L.; Wu, F.; Hall, R.; Davis, C. Electromagnetic sensors for in-situ dynamic microstructure monitoring of recovery and recrystallisation in interstitial free steels. J. Magn. Magn. Mater. 2022, 551, 169187. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169187>.
- [11] HaŠková, Lenka, UŠák, Elemír. "Non-destructive inspection of steel-based structural components: Exploring the potential of magnetic adaptive testing for measurement and Metrology". AIP Conference Proceedings. Conference Paper. 2024, pp.204-207.
- [12] Elemír UŠák, Lenka HaŠková, Daniel Vašut, Mariana UŠáková. "Modification of Magnetic Adaptive Testing: Progressive Method for Nondestructive Inspection of Microstructural Changes in Ferromagnetic Constructional Materials". September 2023 Journal of Nondestructive Evaluation 42(3). DOI: 10.1007/s10921-023-00994-2.
- [13] Ping Fu, Shurui Zhang, Yujue Wang, Xiucheng Liu, Hexuan Li, Peng Li, Cunfu He. "Theoretical model for the time-frequency spectrum of magnetic Barkhausen noise". NDT & E International Volume 158, March 2025. 10.1016/j.ndteint.2025.103553.
- [14] EN 1330-4:2011 - Non-destructive testing - Terminology - Part 4: "Terms used in ultrasonic testing".
- [15] S.Yu. Pliesnetsov, G.M. Suchkov, R.P. Mygushchenko, O.Yu. Kropachek, Yu.O. Pliesnetsov, A.V. Donchenko. Application of ultrasonic packet pulses of raleigh waves for testing the hardness of surface-hardened metals. echnical Diagnostics and Non-Destructive Testing) #2, 2023, pp. 28-33. <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.02.04>.
- [16] S.A. Nedoseka, A.Ya. Nedoseka, M.A. Yaremenko, M.A. Ovsienko, O.M. Hurianov. "Application of acoustic emission method to evaluate the changes in the properties of 17G1S steel after long-term service". Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing. #3, 2023, pp. 26-30. <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.03.05>.
- [17] Yanming Guo, Donald R. Todd, David A. Koch, Julian D. Escobar Atehortua, Nicholas A. Conway, Morris S. Good, Mayur Pole, Kathy New, David M. Brown. "Grain Size Measurement of 316L Stainless Steel after Solid Phase Processing Using Ultrasonic Nondestructive Evaluation Method@. Volume 44, article number 124, (2025). 10.1007/s10921-025-01264-z.
- [18] Mawhin M.A., Seuaciuc-Osorio T. "Nondestructive Microstructure Characterization of Tempered Martensitic Steels Through Data Fusion". Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems Article 2022. DOI: 10.1115/1.4054230.

ISSN: 2617-846X (online)

Рибіцький Ігор Володимирович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3596-3918>

Войтенко Сергій Станіславович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4134-5964>

Карпаш Олег Михайлович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4217-2666>

Коваль Олександр Васильович  
Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8040-8860>  
Запека Віталій Юрійович  
Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3143-6600>  
Дата отримання статті -17.10.25.  
Дата фінального варіанту – 07.11.25.  
Дата публікації- 30.12.25.