

УДК 620.179

КОМПЛЕКСНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

О. М. КАРПАШ, Є. Р. ДОЦЕНКО, М. О. КАРПАШ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Наведено результати лабораторних випробувань інформаційно-вимірювальної системи для визначення фізико-механічних характеристик конструкційних сталей феритно-перлітної структури. Отримано математичну модель контролю питомого електричного опору плоских зразків електроконтактним чотиризондовим методом. Розкрито спосіб визначення границі текучості сталей за значеннями їх питомого електричного опору і твердості з використанням алгоритмів штучних нейронних мереж.

Ключові слова: *фізико-механічні характеристики, границя текучості, питомий електричний опір, конструкційні сталі, чотиризондовий метод, нейронні мережі.*

Проблема забезпечення надійного та безпечного використання металоконструкцій з кожним роком стає все актуальнішою, оскільки їх зношення значно перевищує темпи технічного переоснащення. Впродовж експлуатації матеріали металоконструкцій зазнають пошкодження, природа якого залежить від виду навантаження та умов користування (циклічне навантаження, високі та низькі температури, корозійне середовище і т.д.). Сумісний вплив зазначених чинників призводить до зміни мікроструктури і фізико-механічних характеристик (ФМХ) матеріалу металоконструкцій [1]. Крім того, як показує практика, в користуванні перебуває значна кількість устаткування, на яке втрачена експлуатаційна документація. Це також зумовлює необхідність проведення регулярного контролю фактичних фізико-механічних характеристик матеріалів для виявлення відхилень їх значень від нормативних.

Вітчизняні та іноземні вчені активно працюють над розробленням нових методів та засобів визначення ФМХ [2–9]. Сьогодні значну увагу приділяють комплексним підходам до оцінки ФМХ сталей з врахуванням кількох інформативних параметрів. Особливий інтерес викликають методи, які враховують інформативні параметри, що відносяться до різних типів фізичних полів (магнетних, електричних, теплових тощо) [10]. Розробка нових методів багатопараметрового контролю вимагає вирішення двох основних завдань: вибір оптимального набору параметрів контролю та розробка (чи вибір наявних) відповідних вимірювальних засобів.

Зокрема, запропоновано для визначення ФМХ використовувати структурно чутливі інформативні параметри. Враховуючи вищенаведене і результати теоретичних досліджень [11, 12], розробили комплексний метод контролю ФМХ за кількома параметрами: твердістю, коефіцієнтом теплопровідності та питомим електричним опором, значення яких регламентуються в сертифікатах та нормативних документах на сталь [13]. Метод передбачає вимірювання нормативних фізичних характеристик, значення яких будуть використані для розрахунку границь текучості та міцності.

На першому етапі практична реалізація запропонованого підходу була здійснена у вигляді інформаційно-вимірювальної системи ФМХ-1, за допомогою якої

Контактна особа: Є. Р. ДОЦЕНКО, e-mail: dotsenko@nung.edu.ua

визначили фактичні механічні характеристики (значення границь текучості та міцності) трубних сталей за вимірними значеннями твердості та теплопровідного інформативного параметра, який залежить від дійсних значень теплопровідності [14].

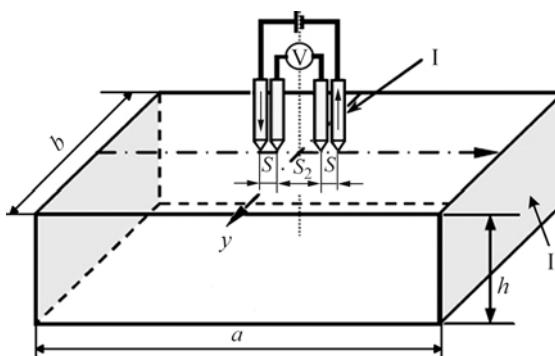
Однією з основних перешкод у практичній реалізації комплексного методу є відсутність технічних засобів для вимірювання малих значень (порядку $10 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$) питомого електричного опору феромагнетних матеріалів. Наявні вихрострумові прилади контролю питомої електропровідності (величина, обернена до питомого електричного опору) поширюються тільки на немагнетні матеріали [15]. Тому наступний етап – розроблення установки для визначення питомого електричного опору сталей. Теоретичні дослідження показали, що для вирішення такої задачі найдоцільніше використати чотиризондовий електроконтактний метод на постійному струмі, оскільки при цьому магнетна проникність металу не впливає на результати вимірювання [11]. Крім того, він дає змогу отримати значення питомого опору у товщі металу, що неможливо досягнути вихрострумовим методом через невелику глибину проникнення електромагнетного поля.

Для достовірності визначення питомого електричного опору провели математичне моделювання контролю питомого опору плоских зразків прямокутної форми чотиризондовим методом. При цьому встановили аналітичні залежності, які описують вплив кінцевих розмірів металоконструкцій на результати вимірювання [16].

Принцип чотиризондового методу вимірювання питомого електричного опору такий [17]. На поверхні об'єкта контролю вздовж однієї прямої лінії розміщують вимірювальний перетворювач, який містить чотири металеві електроди-зонди з малою (до $0,5 \text{ mm}^2$) площею контакту (рис. 1). Через два зовнішні зонди пропускають електричний струм, генерований джерелом постійного струму, а на двох внутрішніх вимірюють падіння напруги. За вимірним значенням різниці потенціалів та струму можна визначити питомий електричний опір матеріалу зразка [16].

Рис. 1. Чотиризондовий метод вимірювання питомого електричного опору матеріалів:
I – чотиризондовий вимірювальний перетворювач;
II – об'єкт контролю.

Fig. 1. Four-point probe technique for measurement of electrical resistivity of materials:
I – four-point probe transducer;
II – testing object.



Коли чотиризондовий вимірювальний перетворювач розміщений у центрі прямокутного зразка, а зонди – вздовж центральної лінії, паралельної довшій стороні зразка (рис. 1), питомий електричний опір розраховують за формулою [16]

$$\rho = \frac{U}{I} 2\pi S f(m, a/S, b/S, h/S), \quad (1)$$

де U – падіння напруги, I – сила струму, $f(m, a/S, b/S, h/S)$ – геометрична функція поправки, яка залежить від реальних кінцевих розмірів (довжини a , ширини b та товщини h) прямокутного зразка та співвідношення лінійних розмірів системи зондів $m = S_2 / S$, S – відстань між струмовими та відповідними потенціальними зондами, S_2 – відстань між потенціальними зондами (див. рис. 1).

У результаті проведеного математичного моделювання шляхом застосування методу дзеркальних відображень, отримали формулу для розрахунку геометричної функції поправки:

$$f\left(m, \frac{a}{S}, \frac{b}{S}, \frac{h}{S}\right) = \left[\frac{-2m}{m+1} + \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{g=0}^{\infty} (-1)^k \cdot \left\{ \frac{2 \left[n^2 (b/S)^2 + (k(a/S) \pm 1)^2 + 4g^2 (h/S)^2 \right]^{-1/2} - \left[-2 \left[n^2 (b/S)^2 + (k(a/S) \pm [m+1])^2 + 4g^2 (h/S)^2 \right]^{-1/2} \right\}}{\right\} \right]^{-1}, \quad (2)$$

де k, n, g – кількість рівнів уявних джерел струму, які вводять для просторової побудови системи дзеркальних відображень у тривимірній системі координат з метою виконання на всіх гранях зразка однорідної умови Неймана (нормальна складова густини струму на всіх гранях рівна 0).

За результатами чисельного експерименту встановлено, що для практичних розрахунків достатньо, щоб мінімальна кількість рівнів k, n, g становила 30.

Для уникнення окремих вимірювань сили струму та падіння напруги, доцільно використати мікроомметр, оскільки принцип вимірювання електричного опору базується саме на чотиризондовому методі. Крім того, теоретичні дослідження показали, що для визначення малих значень питомого електричного опору сталей з похибкою $\pm 10 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$ необхідний мікроомметр.

Тоді формулу (1) можна записати так:

$$\rho = 2\pi R S f(m, a/S, b/S, h/S), \quad (3)$$

де R – покази мікроомметра.

Адекватність формули для розрахунку питомого електричного опору прямокутних зразків була експериментально перевірена на 10 зразках зі сталі 45 різних геометричних розмірів.

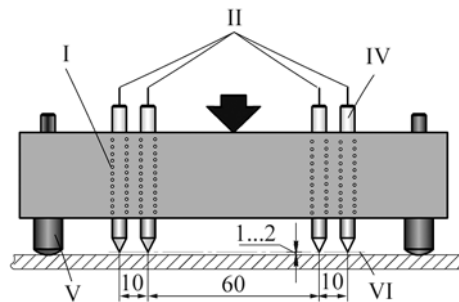
Розроблена установка для вимірювання питомого електричного опору чотиризондовим методом складається з контактної та вимірювальної блоків. Вимоги до контактної блоку такі: оптимальні розміри взаємного розташування зондів для досягнення високої чутливості методу; односторонній доступ до поверхні об'єкта контролю; висока міцність матеріалу зондів, до вимірювальної такі: високий вхідний опір вимірювача напруги для уникнення впливу контактних перехідних опорів на результати вимірювання; можливість вимірювання низьких значень активного електричного опору.

Як вимірювальний блок використали атестований мікроомметр БСЗ-010-2 (АООТ "Самараэнерго", сер. № 135). Для контактної блоку, за результатами математичного моделювання, було запропоновано конструкцію чотиризондового вимірювального перетворювача з одностороннім доступом до поверхні об'єкта контролю (рис. 2).

У вимірювальному перетворювачі зонди круглого перерізу виготовлені зі термостійкої нержавіючої сталі марки 95X18 і загартовані. Діаметр зондів 5 mm. Відстань між внутрішніми потенціальними зондами $(60 \pm 0,1)$ mm, а між струмовими та відповідними потенціальними зондами – $(10 \pm 0,1)$ mm. Такі лінійні розміри системи зондів, отримані під час математичного моделювання, оптимальні для забезпечення заданої чутливості чотиризондового методу за напругою, що доцільно для вимірювання малих значень питомого опору сталей [16].

Рис. 2. Конструкція чотиризондового вимірювального перетворювача:
 I – пружина; II – до мікроомметра;
 III – навантаження; IV – зонд; V – опора
 (Ø 10 mm); VI – умовна лінія зондів.

Fig. 2. Design of a four-point probe transducer: I – spring; II – to microohmmeter;
 III – load; IV – probe; V – support
 (Ø 10 mm); VI – conventional line of probes.



У кутах корпусу розміщено чотири опори, підпружинені пружинами стиску за напрямком корпусу. Підпружинення опор та зондів дає змогу самовстановлюватись корпусу та лінії зондів відносно досліджуваної поверхні з урахуванням її незначних нерівностей. Окрім того, зонди та опори виготовлено з можливістю осьового переміщення відносно корпусу, що дасть змогу в перспективі проводити вимірювання питомого електричного опору на циліндричних поверхнях, наприклад, трубах великого діаметру. Для встановлення стабільного електричного контакту зондів із об'єктом контролю (ОК), на перетворювач через вмонтований стрижень насаджують навантажувальну гантель масою $(10 \pm 0,05)$ kg.

Переваги розробленої конструкції чотиризондового вимірювального перетворювача такі: підвищена чутливість, невеликий операційний час на контроль, односторонній доступ до поверхні ОК. На цю конструкцію отримано патент [18].

Загальний вигляд дослідного взірця інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) для визначення фізико-механічних характеристик сталей зображено на рис. 3.

Рис. 3. Загальний вигляд дослідного взірця інформаційно-вимірювальної системи: I – мікроомметр БСЗ-010-2; II – чотиризондовий вимірювальний перетворювач; III – стрижень; IV – навантажувальна гантель; V – динамічний твердомір ТД-32; VI – цифровий термометр Fluke 54-II; VII – контактна термопара; VIII – портативний комп'ютер; IX – об'єкт контролю.

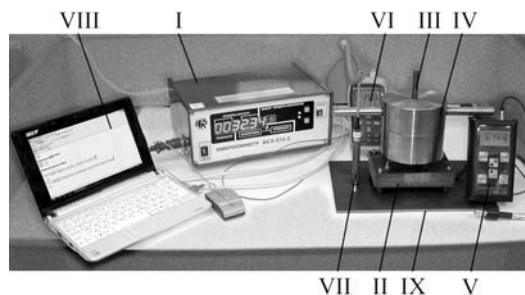


Fig. 3. General view of a research sample of information and measuring system:
 I – microohmmeter BSZ-010-2; II – four-point probe transducer; III – bar;
 IV – loading dumbbell; V – dynamic hardness meter TD-32; VI – digital thermometer
 Fluke 54-II; VII – patch thermocouple; VIII – laptop; IX – testing object.

Технологія визначення питомого електричного опору за допомогою розробленої ІВС така. Чотиризондовий вимірювальний перетворювач без навантаження встановлюють на попередньо підготовлену досліджувану поверхню ОК. Гайками, нагвинченими на упори підлаштовують положення корпусу разом із зондами для забезпечення зазору $1 \dots 2$ mm між ними і поверхнею ОК (див. рис. 2). Після цього плавно насаджують навантажувальну гантель на стрижень. Як наслідок, пружини на опорах стискаються, забезпечуючи самовстановлення корпусу на поверхні ОК. Таким чином, встановлюють необхідний для вимірювання стабільний електричний контакт зондів із об'єктом контролю.

Методика проведення експериментальних досліджень для визначення фізико-механічних характеристик сталей така. Відібрали 14 плоских зразків прямокутної форми з конструкційних низьколегованих сталей феритно-перлітної

структури, але різної міцності. На кожному зразку провели 10-кратні вимірювання твердості та електричного опору. На очищену від забруднень та механічно зачищену в місці контакту зондів і щупа твердоміра поверхню ОК приклали чотиризондовий вимірювальний перетворювач. При цьому його розмістили в центрі зразка, а лінію зондів – вздовж центральної лінії, паралельної довшій стороні.

Вимірювання проводились в однакових лабораторних умовах за температурою $20 \pm 0,3^\circ\text{C}$, яку реєстрували цифровим термометром, оснащеним контактною термопарою. Розраховували питомий електричний опір за формулами (2) і (3) на портативному комп'ютері зі встановленим спеціалізованим програмним забезпеченням. Оскільки питомий електричний опір температурно залежна характеристика, то під час контролю за реальних умов слід розраховувати поправку через температурний коефіцієнт опору (ТКО) [19].

Значення границі текучості визначили шляхом проведення руйнівних випробувань на розтяг стандартних пропорційних сталевих зразків, виготовлених з повнорозмірних зразків, на розривній машині [20]. Усереднені результати досліджень наведено в таблиці.

Результати експериментальних досліджень фізико-механічних характеристик сталевих зразків

Позначення зразка	Відношення розмірів зразків до S			Геометрична функція поправки f , а. у.	Електричний опір R , $\times 10^{-6} \Omega$	Питомий електричний опір ρ , $\times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$	Твердість за шкалою Брінеля, HB	Границя текучості σ_T , МПа
	h/S	a/S	b/S					
1	1	34,6	9	0,2037	13,97	178	141,5	238
2	1,42	35	19,5	0,3156	10,00	198	114,9	251
3	1,47	33	3	0,1523	27,97	267	122,2	253
4	1,26	30	20	0,2870	18,25	329	175,6	349
5	1,63	30	16,4	0,3416	7,72	165	123,2	246
6	0,83	30	19,6	0,1990	11,28	141	133,1	294
7	1,17	30	19,7	0,2703	10,15	172	139,2	268
8	0,5	30	19,5	0,1216	22,54	172	160,6	269
9	0,7	40	27,6	0,1737	33,47	370	184,2	384
10	0,85	39,5	7,4	0,1638	21,83	224	168,7	294
11	1,1	40	5	0,1703	35,66	380	215,2	470
12	1,17	40	6,5	0,2059	24,36	315	234,8	392
13	1,88	40,3	18,4	0,3805	16,75	398	221,2	472
14	1,65	28	16,2	0,3436	18,92	411	218,6	492

Побудовано (рис. 4а, б) графіки залежностей границі текучості від питомого електричного опору та твердості, відповідно. Також зображено криві апроксимації.

Залежність границі текучості від питомого електричного опору апроксимована функцією $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$, де $a = 156,03$, $b = 2,69 \cdot 10^{-3}$, коефіцієнт кореляції між ними 0,69, а залежність границі текучості від твердості – функцією $f(x) = ax + b$, де $a = 2,03$, $b = -6,83$; коефіцієнт кореляції 0,91.

Залежності границі текучості від інформативних параметрів мають прямо пропорційний характер, що узгоджується із раніше встановленими теоретично кореляційними залежностями [12].

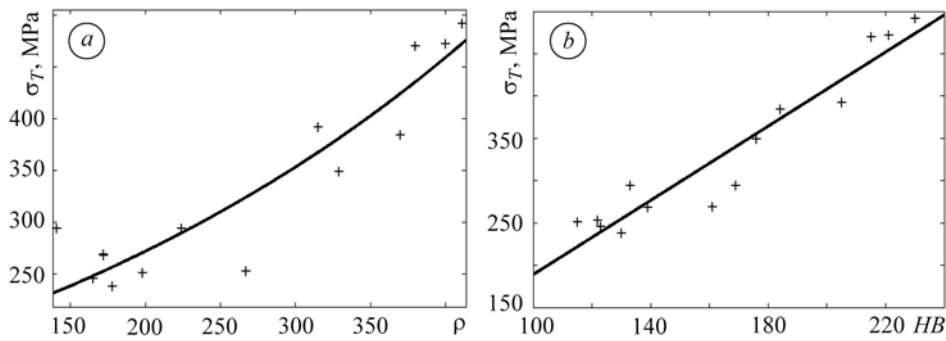


Рис. 4. Залежність границі текучості від питомого електричного опору (а) та твердості сталей (b).

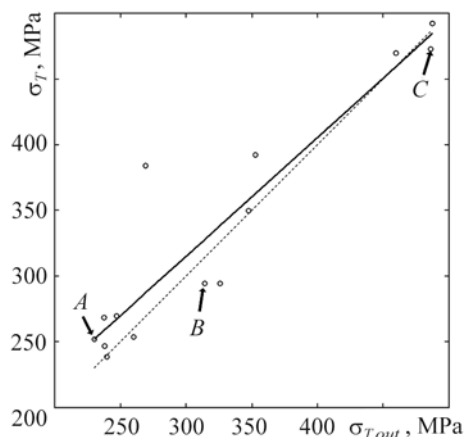
Fig. 4. Dependence of yields strength on electric resistivity (a) and hardness (b) of steels.

Беручи до уваги те, що коефіцієнти кореляції загалом вказують на нелінійний характер залежності границі текучості від твердості та питомого електричного опору, доцільно апроксимувати границю текучості, враховуючи твердість та питомий електричний опір у комплексі. Такого класу задачі можуть бути успішно вирішені за допомогою штучних нейронних мереж (ШНМ) [21]. Нейронна мережа заданої будови тренувалась для розв'язання задачі апроксимації граници текучості як функції двох вимірюваних параметрів – твердості та питомого електричного опору. Шляхом порівняння тестових виходів натренованих нейронних мереж встановили, яка структура мережі оптимальна з точки зору мінімальної похибки визначення граници текучості. Як тренувальний, в усіх мережах застосовувався алгоритм Левенберга–Марквардта [22], який характеризується швидким сходженням. Найоптимальнішою виявилася ШНМ з архітектурою 10×1 (в першому прихованому шарі міститься 10 нейронів, у другому – 1).

Для оцінювання точності роботи мережі провели регресійний аналіз в програмному середовищі MathLab за допомогою функції $\text{postreg}(t, x)$, де t – цільовий вектор, x – вихідний вектор мережі. Ця функція порівнює вихідний масив мережі з цільовим (рис. 5), де вихідним аргументом є коефіцієнт кореляції $R = 0,929$. Абсолютна похибка тестування нейромережі 26 МПа.

Рис. 5. Розкид вихідних значень мережі ($\sigma_{T \text{ out.}}$) відносно лінії регресії: \circ – вихідні значення мережі; штрихова лінія – пряма для ідеального випадку ($R = 1$); суцільна – лінія регресії для вихідного вектора мережі ($R = 0,929$); A, B, C – вихідні значення мережі для зразків, які не використовувалися під час тренування.

Fig. 5. Scattering of the initial values of network ($\sigma_{T \text{ out.}}$) with respect to the regression line: \circ – outputs of the network; dashed – line for ideal case ($R = 1$); solid – regression line for output pattern of the network ($R = 0.929$); A, B, C – outputs of the network for samples that were not used for the training.



Таким чином, за результатами виконаних експериментальних досліджень за допомогою розробленого дослідного взірця ІВС можемо стверджувати, що комп-

лекс параметрів (твердість та питомий електричний опір) може бути використаний для визначення границі текучості матеріалів металоконструкцій. Ці результати також підтверджують раніше одержані теоретичні висновки щодо вибору інформативних параметрів контролю [11, 12].

ВИСНОВКИ

Створено дослідний зрізець інформаційно-вимірювальної системи, яка реалізує чотиризондовий метод визначення питомого електричного опору сталей і проведено багатократні вимірювання на відібраних зразках феритно-перлітних сталей. Перерахунок вимірюваних значень електричного опору в питомий опір здійснюється з допомогою розробленої математичної моделі. За результатами експериментальних досліджень встановлено характер залежності границі текучості феритно-перлітних сталей від обраного комплексу параметрів (питомого електричного опору та твердості) – прямо пропорційний для обох випадків. Виявлено, що цей комплекс параметрів відзначається значними коефіцієнтами кореляції з границею текучості (твердість – 0,91 та питомий електричний опір – 0,69). Використано сучасні методи статистичної обробки інформації (штучні нейронні мережі) для апроксимації границі текучості як функції параметрів твердість–питомий опір. При цьому абсолютна похибка тестування нейромережі становила 26 МПа. Для застосування розробленого зрізця ІВС на реальних металоконструкціях необхідно дотримуватися певних вимог. По-перше, в місці контакту зондів та щупа твердоміра з об'єктом контролю, необхідна механічна зачистка поверхні до металічного блиску. По-друге, під час вимірювання за температури, відмінної від 20°C, необхідно враховувати температурний коефіцієнт опору сталі. Вимірювати необхідно на об'єктах контролю з плоскою поверхнею. Для застосування ІВС на об'єктах різної форми (зокрема, трубах), необхідно розробити відповідні математичні моделі контролю питомого електричного опору чотиризондовим методом, що є метою подальших досліджень.

РЕЗЮМЕ. Приведены результаты лабораторных испытаний информационно-измерительной системы для определения физико-механических характеристик конструкционных сталей ферритно-перлитной структуры. Получена математическая модель контроля удельного электрического сопротивления плоских образцов электроконтактным четырехзондовым методом. Раскрыт способ определения предела текучести сталей по значениям их удельного электрического сопротивления и твердости с использованием алгоритмов искусственных нейронных сетей.

SUMMARY. The paper presents results of laboratory tests of the information and measuring system, designed for determining physical and mechanical properties of ferrite-pearlite structural steels. The mathematical model of plane samples electrical resistivity testing by the four-point probe technique is developed. The technique for determining steels yield strength by values of electrical resistivity and hardness using artificial neural network algorithms is described.

1. Гумеров А. Г., Гумеров Р. С., Гумеров К. М. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов. – М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2003. – 310 с.
2. Карнаш О. М., Молодецкий И. А., Карнаш М. О. Общий обзор методов оценки физико-механических характеристик металлов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. – № 2. – С. 18–22.
3. Определение механических характеристик стали методом акустической эмиссии / Ю. И. Фадеев, О. А. Бартенев, З. Г. Волкова, Н. Г. Чекмарев // Дефектоскопия. – 1987. – № 8. – С. 44–49.
4. Бида Г. В., Горкунов Э. С., Шевнин В. М. Магнитный контроль механических свойств проката. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 250 с.
5. Безлюдко Г. Я., Мужичицкий В. Ф., Ремезов В. Б. Серия портативных приборов-структуроскопов, основанных на измерении величины коэрцитивной силы // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 6. – С. 7–10.

6. *Лебедев А. О., Музыка М. Р.* Технічна діагностика стану матеріалу методом L-M твердості // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / Під заг. ред. Б. Є. Патона. – К.: Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 97–101.
7. *Определение* механических свойств материалов методом идентификации при динамическом (циклическом) нагружении / Ю. В. Мильман, К. Э. Гринкевич С. И. Чугунова и др. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / Під заг. ред. Б. Є. Патона. – К.: Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2009. – С. 33–37.
8. *Цирульник О. Т.* Оцінювання електрохімічними методами експлуатаційної деградації низьколегованих сталей та алюмінієвих сплавів // *Машинознавство*. – 2008. – № 6. – С. 19–25.
9. *Електрохімічна* оцінка експлуатаційної деградації авіаційного алюмінієвого сплаву / Г. М. Никифорчин, О. П. Осташ, О. Т. Цирульник та ін. // *Фіз. хім. механіка матеріалів*. – 2008. – № 2. – С. 87–91.
(*Н. М. Nykyforchyn, O. P. Ostash, O. T. Tsyurul'nyk, I. M. Andreiko, and Yu. V. Holovatyuk* Electrochemical Evaluation of the In-Service Degradation of an Aircraft Aluminum Alloy // *Material Science*. – 2008. – № 2. – P. 254–259.)
10. *Карпаш М. О.* Обґрунтування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій // *Методи та прилади контролю якості*. – 2004. – № 12. – С. 30–33.
11. *Карпаш О. М., Доценко Є. Р., Карпаш М. О.* Питомий електричний опір як інформативний параметр визначення фактичних фізико-механічних характеристик матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2009. – № 1. – С. 36–41.
12. *Карпаш М. О., Доценко Є. Р., Карпаш О. М.* Новий підхід до визначення фізико-механічних характеристик сталей з врахуванням їх структури // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів*. Вип. 13: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій. – Львів, 2008. – С. 203–208.
13. *Марочник* сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др. / Под общ. ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
14. *Кісіль І. С., Карпаш М. О., Вацшиак І. Р.* Прилад для контролю фізико-механічних характеристик сталей ФМХ-1 // *Методи та прилади контролю якості*. – 2005. – № 14. – С. 77–80.
15. *Дорофеев А. Л., Еришов Р. Е.* Физические основы электромагнитной структуроскопии. – Новосибирск: Наука, 1985. – 180 с.
16. *Доценко Є. Р.* Математичне моделювання контролю питомого електричного опору матеріалів електроконтактним чотиризондовим методом // *Розвідка та розробка нафтогазових родовищ*. – 2010. – № 1. – С. 82–90.
17. *Michael B. Heaney.* Electrical Conductivity and Electrical Conductivity and Resistivity // *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. – CRC Press LLC, 1999. – Chapter 43. – ISBN 084932145X.
18. *Патент 54344 Україна, МПК G01R 27/14.* Пристрій для вимірювання питомого електричного опору провідних матеріалів / Є. Р. Доценко, М. О. Карпаш, Ю. М. Бурда, Амітава Мітра. – Опуб. 10.11.2010; Бюл. № 21. – 4 с.
19. *Черепин В. Т.* Экспериментальная техника в физическом металловедении. – К.: Техніка, 1968. – 280 с.
20. *ГОСТ 1497-84.* Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Госстандарт СССР, 1986. – 28 с.
21. *Руденко О. Г., Бодяньський Є. В.* Штучні нейронні мережі: Навч. пос. – Харків: ТОВ “Компанія СМІТ”, 2006. – 404 с.
22. *Осовский С.* Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И. Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.

Одержано 14.03.2011