

## ОЦІНКА ЯКІСНИХ ЗМІН МІКРОСТРУКТУРИ СТАЛЕЙ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА КОМПЛЕКСОМ ЇХ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

В. Д. Миндюк, А. М. Карпаш

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Abstract.** The optimal quantity of the best correlated physical parameters with the microstructure parameters is established. Depending functions between the two microstructure features and the complex with three physical properties are obtained by using artificial neural networks algorithm for the non-destructive determination of the actual quality state of the ferritic steel grade microstructure during their long-term using.

Забезпечення надійності та прогнозування технічного стану сталевих елементів металоконструкцій має надзвичайно велике практичне значення. Однак, в нормативно-технічних документах, що застосовуються при розрахунку залишкового ресурсу металоконструкцій, не враховується рівень мікроструктурної деградації матеріалів і конструкцій у процесі експлуатації, що істотно знижує достовірність прогнозу. Забезпечення безаварійної експлуатації обладнання можливе тільки на основі отримання й аналізу об'єктивних інструментальних даних про фактичний стан його матеріалів. Тому особливо важливим науково-практичним завданням є всебічне вивчення мікроструктурних змін, що відбуваються в сталях металоконструкцій у процесі їх тривалої експлуатації

В роботах [1, 2] авторами роботи було проведено інструментальні дослідження щодо встановлення наявності та характеру взаємозв'язку між фазо- і структурночутливими параметрами методів неруйнівного контролю із основними характеристиками мікроструктури певних марок конструкційних сталей, а саме: співвідношення між структурною і фазовою складовими мікроструктури сталевих зразків ( $P/Fe$ ), а також середніми розмірами зерен ( $\bar{D}$ , мкм).

Комплекс досліджень виконувався на зразках доевтектоїдних вуглецевих та низьколегованих сталей як у стані поставки, так і з різним терміном експлуатації, які використовують, зокрема, для конструкцій нафтогазового обладнання, що працює в складних умовах циклічних навантажень, і схильні до деформаційного старіння.

Таблиця 1. Перелік марок сталей, що піддавались дослідженням

Марка сталі	Нормативний документ, що регламентує властивості
Сталь 10пс	ГОСТ 1050-88
Сталь 10	ГОСТ 1050-88
Сталь 09Г2С	ГОСТ 19281-89
Ст3пс	ГОСТ 380-71
Ст4пс	ГОСТ 380-71
Сталь 09Г2	ГОСТ 19281-89
Сталь 10Г2С1	ГОСТ 19282-73
Сталь 40Г	ГОСТ 4543-71
Сталь 45	ГОСТ 1050-81
Сталь 60Г	ГОСТ 14959-79

Для встановлення залежності між параметрами мікроструктури та фізичними властивостями досліджуваних матеріалів були розраховані коефіцієнти кореляцій між відповідними параметрами за формулою

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

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

Результати досліджень показали, що серед обраних п'яти фізичних та двох мікроструктурних досліджуваних параметрів [3] спостерігається хороша кореляція між співвідношенням перліт/ферит ( $P/Fe$ ) та: твердістю  $HB$  ( $R=0,79$ ), коерцитивною силою  $H_c$  ( $R=0,90$ ) та магнітним індуктивним параметром  $I$  ( $R= -0,58$ ) відповідно. Знак мінус в останньому випадку говорить про обернену залежність. Кореляція між середнім розміром зерна ( $\bar{D}$ ) та цими ж фізичними параметрами і незначною:  $R=0,33$ ;  $R=0,50$ ;  $R= -0,19$  відповідно. Такі структурно чутливі параметри, як питомий електричний  $\rho$  опір та теплопровідна характеристика  $T$  мають незначну кореляцію ( $R \leq 0,4$ ) з обраними параметрами мікроструктури через невисоку чутливість методів до структурних змін на мікрорівні, тому в подальших дослідженнях вони не застосовувались. Як правило, значення, що перебувають в межах від  $0,4$  до  $0,8$  вказують не на відсутність зв'язку між досліджуваними характеристиками, а на його нелінійний характер. Таким чином, результати кореляційного аналізу допомогли відкинути відразу інформативні параметри, що ніяким чином не пов'язані з цільовим та вказати на можливий нелінійний характер залежності.

Нелінійний характер зв'язку між обраними параметрами мікроструктури і фізичними параметрами попарно робить доцільним застосування фізичних параметрів в комплексі для подальшої апроксимації зв'язку між ними.

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

При формуванні комплексних наборів даних керувались правилом перебору всіх можливих варіантів, тобто в разі наявності 3 інформативних параметрів слід сформувати 4 набори даних: 3 набори з 2-ох параметрів та 1 набір з 3-ох параметрів. Для цих випадків були одержані рівняння лінійної регресії за значеннями попарних груп вхідних параметрів. Коефіцієнти лінійної регресії знаходились за методом найменших квадратів (табл.2).

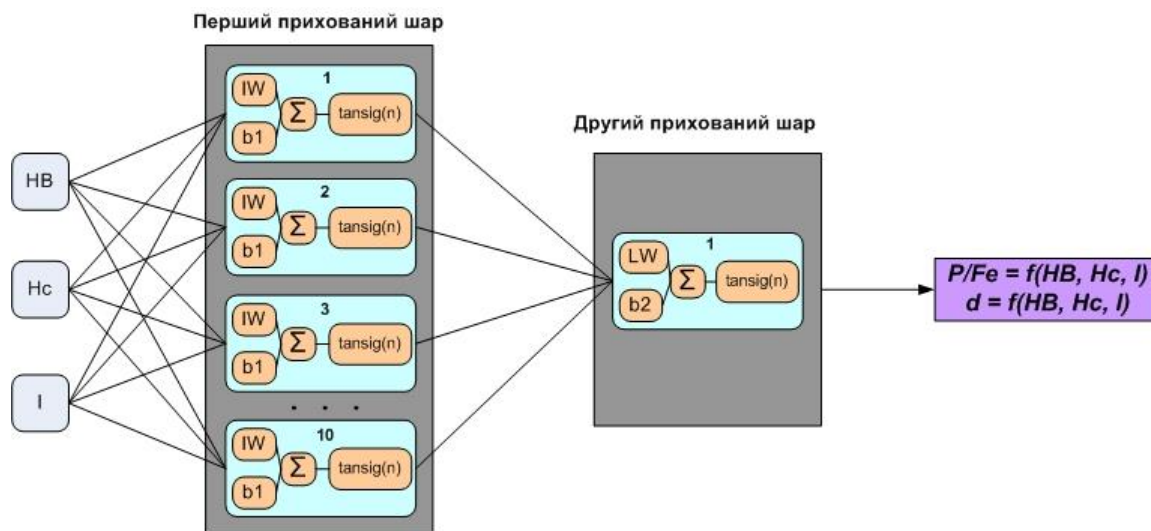
Як бачимо з таблиці 2, квадрат кореляції між групою аргументів та функцією (наближення цього значення до одиниці свідчить про краще моделювання) має найвищі значення при застосуванні у якості вимірюваних параметрів структурночутливих магнітних властивостей (коерцитивної сили та індуктивного параметру), що черговий раз підтверджує правильність вибору вказаних магнітних параметрів контролю. При оцінюванні середнього діаметру зерна більш достовірним буде результат при урахуванні трьох фізичних параметрів контролю (коерцитивної сили, індуктивного параметру та твердості), при визначенні співвідношення фаз достовірним результат буде при комплексному врахуванні як трьох параметрів (коерцитивної сили, індуктивного параметру та твердості), так і комбінації значень коерцитивної сили та індуктивного параметру  $I$ .

Оскільки кореляційний аналіз дав можливість встановити тільки наявність чи відсутність залежності між досліджуваними параметрами, а не оцінити її характер, то для встановлення, власне, характеру зв'язку між параметрами мікроструктури і фізичними властивостями досліджуваної групи сталей. Для вирішення цієї задачі було використано алгоритми штучних нейронних мереж (ШНМ).

Таблиця 2. Рівняння лінійних регресій між вимірними параметрами досліджуваних сталей

Функція залежності	Рівняння лінійної регресії	Коефіцієнти регресії	Коефіцієнт узгодженості $R^2$
$P/Fe = f(Hc, HB, I)$	$Y = A0 + A1 \cdot Hc + A2 \cdot HB + A3 \cdot I$	$A0 = 1,633; A1 = 0,826; A2 = 0,002; A3 = 0,002$	0,9193
$\bar{D} = f(Hc, HB, I)$	$Y = A0 + A1 \cdot Hc + A2 \cdot HB + A3 \cdot I$	$A0 = 46,07; A1 = 6,529; A2 = -0,152; A3 = -0,004$	0,5432
$P/Fe = f(Hc, HB)$	$Y = A0 + A1 \cdot Hc + A2 \cdot HB$	$A0 = -2,277; A1 = 0,896; A2 = 0,003$	0,9038
$P/Fe = f(Hc, I)$	$Y = A0 + A1 \cdot Hc + A3 \cdot I$	$A0 = 1,838; A1 = 0,851; A3 = -0,002$	0,9192
$P/Fe = f(HB, I)$	$Y = A0 + A2 \cdot HB + A3 \cdot I$	$A0 = 0,896; A2 = 0,033; A3 = -0,003$	0,8195
$\bar{D} = f(Hc, HB)$	$Y = A0 + A1 \cdot Hc + A2 \cdot HB$	$A0 = 37,042; A1 = 6,69; A2 = -0,149$	0,5409
$\bar{D} = f(Hc, I)$	$Y = A0 + A1 \cdot Hc + A3 \cdot I$	$A0 = 25,486; A1 = 4,004; A3 = -0,002$	0,5032
$\bar{D} = f(HB, I)$	$Y = A0 + A2 \cdot HB + A3 \cdot I$	$A0 = 40,246; A2 = 0,097; A3 = -0,011$	0,3433

Нейронна мережа заданої архітектури (10x1x1) (рис.1) тренувалась для вирішення задачі апроксимації окремо середнього розміру зерна та співвідношення фазових складових від двох або трьох вимірюваних параметрів, описаних вище. Нейромережевий підхід було використано, зокрема, для отримання функцій залежностей між комплексом фізичних вимірних параметрів та окремо середнім розміром зерна і відношенням фазових складових.



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

Рис.1. Архітектура нейромережі для визначення параметрів мікроструктури за трьома вхідними параметрами:  $HB, Hc, I$

Одержані функції залежності середнього розміру зерна та відношення фазових складових від фізичних параметрів ( $HB, Hc, I$ ) в комплексі мають вигляд:

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

$$P/Fe = \frac{20}{1 + e^{-2 \left( \sum_{n=1}^{10} LW\{2,1\} \cdot \frac{2}{1 + e^{-2 \cdot \sum_{n=1}^{10} (IW\{1,1\}) \cdot \left( \frac{HB-100}{200} \right) \cdot \left( \frac{HC-1}{12} \right) \cdot \left( \frac{I-1500}{100} \right)^{+b\{1\}}} \right)} - 1 \right)} - 13,069; \quad (3)$$

де  $\bar{D}$  – середній розмір зерна,  $P/Fe$  – співвідношення фазових складових  $HB$  – твердість за шкалою Брінеля;  $HC$  – коерцитивна сила;  $I$  - значення індуктивного параметра.  $IW\{1,1\}$  – масив коефіцієнтів розмірністю  $10 \times 3$  для перших шарів нейронів;  $b\{1\}$  – масиви вагових коефіцієнтів розмірністю  $10 \times 1$  для перших шарів нейронів;  $LW\{2,1\}$  – масиви коефіцієнтів розмірністю  $1 \times 10$  для других шарів нейронів.

Результати перевірки достовірності одержаних функцій на зразках, що не брали участь в тестуванні, відображені в таблиці 3.

Таблиця 3. Результати перевірки нейромережі

Розраховані значення $\bar{D}$ , мкм	7,78	11,12	95,88	8,57
Дійсні значення $\bar{D}$ , мкм	10,67	10,69	113,50	8,02
Розраховані значення $P/Fe$	0,23	0,36	4,53	0,32
Дійсні значення $P/Fe$	0,20	0,36	5,13	0,26
Середня похибка визначення $\bar{D}$ , %	3,71			
Середня похибка визначення $P/Fe$ , %	2,31			

Дані функції є інструментом для визначення кількісних параметрів мікроструктури за результатами вимірювання фізичних властивостей конструкційних сталей феритного класу. Результати визначення параметрів мікроструктури сталей за даними формулами можуть використовуватися експлуатуючими організаціями для розрахунку дійсних значень механічних характеристик та встановлення їх відповідності заявленим під час вхідного контролю відповідних марок сталей, а також для виявлення ознак деградаційних процесів матеріалу, які виражатиметься у зміні кількісних характеристик мікроструктури на більше, ніж 10% відносно попередніх результатів обстеження обладнання тривалої експлуатації.

### Література.

1. Миндюк В.Д. Характер зв'язку між параметрами мікроструктури і фізико-механічними властивостями сталей тривалої експлуатації // В.Д. Миндюк, О.М. Карпаш, М.О. Карпаш / Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – №4. – С.129 – 133.
2. Миндюк В.Д. Експериментальна перевірка характеру зв'язку між параметрами мікроструктури і фізичними властивостями матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації для оцінки ступеню їх деградації // В.Д. Миндюк, М.О. Карпаш, Е.Р. Доценко / Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2013. - №3 (71). – С. 153 – 163.
3. Миндюк В.Д. Оценка деградации структуры металлоконструкций длительной эксплуатации по изменению их физических свойств // В.Д. Миндюк, М.О. Карпаш, Е.Р. Доценко / Научные известия “NDT days 2013” / SCIENTIFIC PROCEEDINGS. XXI, №2 (139). – 2013. – С. 52 – 54.