

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК, МІКРОСТРУКТУРИ ТА ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

М. О. КАРПАШ, канд. техн. наук (Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України)

Встановлено залежність між механічними характеристиками, мікроструктурою та інформативними параметрами неруйнівного контролю. Запропоновано метод визначення межі плинності та межі витривалості шляхом послідовного вимірювання теплопровідності, питомого електричного опору, визначення мікроструктури за їх значеннями та розрахунку механічних характеристик за допомогою нейронних мереж.

Article aimed on establishment of relationship between mechanical properties, microstructure and informative parameters of non-destructive testing. Method for determination of yield strength and tensile strength using sequential measurement of thermal conductivity, electric resistivity, determination of microstructure using these values and calculation of mechanical properties using neural networks.

Можливість визначення фактичних механічних характеристик матеріалу металоконструкцій тривалої експлуатації чи їх зміни, як правило, цікавить фахівців, які відповідають за безпечність експлуатації. Це особливо важливо для попередження аварій, надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру, що можуть призвести до руйнувань та пошкоджень відповідальних металоконструкцій (ТЕС, АЕС, нафтогазове устаткування для робіт на суші, шельфі та значній глибині тощо). Серед фахівців превалює думка [1], що існуючі методи НК ще не можуть забезпечити достовірного визначення міцнісних характеристик в експлуатаційних умовах. Слід сказати, що інструментарій розроблених методів та засобів НК механічних характеристик (твердість, межа плинності та межа витривалості) є доволі небагатим, обмежується, як правило, визначенням твердості поверхневого шару матеріалу, коерцитивної сили, магнітної проникності та не може в повній мірі відповідати вимогам, що постають у цій сфері [2]. Очевидно, що вказані обставини дають підстави змінити підхід до розв'язання задачі контролю механічних характеристик і перевести його в площину досліджень щодо встановлення їх взаємозв'язку із мікроструктурним станом та інформативними параметрами НК.

Питання взаємозв'язку мікроструктури сталей та їх механічних характеристик може бути розглянуте з позицій використання залежностей, що його описують, для вирішення актуальних на даний момент задач визначення фактичних фізико-механічних характеристик (ФМХ) матеріалів. Особливо це важливо для тих ситуацій, коли єдиною альтернативою визначення ФМХ є застосування неруйнівних методів.

Відомо, що саме ця ситуація відповідає стану справ із згаданими потенційно небезпечними об'єктами тривалої експлуатації, до яких застосовними є виключно методи НК, а також доведеними є процеси зміни їх ФМХ в часі. Слід зауважити, що з огляду на значну кількість чинників впливу характер таких змін важко пояснити, а їх прогнозування за таких умов стає практично неможливим [3]. Відомо також, що зміні ФМХ передують зміни мікроструктурного стану, яка на етапі виготовлення конструкцій визначається хімічним складом сталі та технологічною послідовністю термомеханічного оброблення.

Метою даної роботи є спроба встановлення залежності між мікроструктурним станом конструкційних сталей, інформативними параметрами НК та їх ФМХ.

Раніше [4] автором під час пошуку нових інформативних параметрів для визначення НК ФМХ було виявлено цікаве явище, яке полягає у наступному. Здійснювалось перевіряння закону Відемана—Франца та закону Грюнайзена [5] на відомостях про фізичні властивості та механічні характеристики наступних іноземних марок нержавіючих сталей: 301, 304, 310, 321, 347, 409, 410, 416, 420, 430, 430F, 440, 431, 630, 904L, UR52N+, 2205, 3CR12, 253MA. За мікроструктурним станом вони представляли мартенситні, феритні, аустенітні та дуплексні (феритно-аустенітні) сталі.

Було встановлено, що значеннями відношення коефіцієнта температурного розширення до теплоємності (відповідно до закону Грюнайзена) та відношення теплопровідності до питомого електричного опору (за законом Відемана—Франца) сталі розподілились за мікроструктурними групами — мартенситні та феритні, дуплексні та аустенітні (рис. 1). Таке припущення підтверджується аналогічним розподілом на структурні

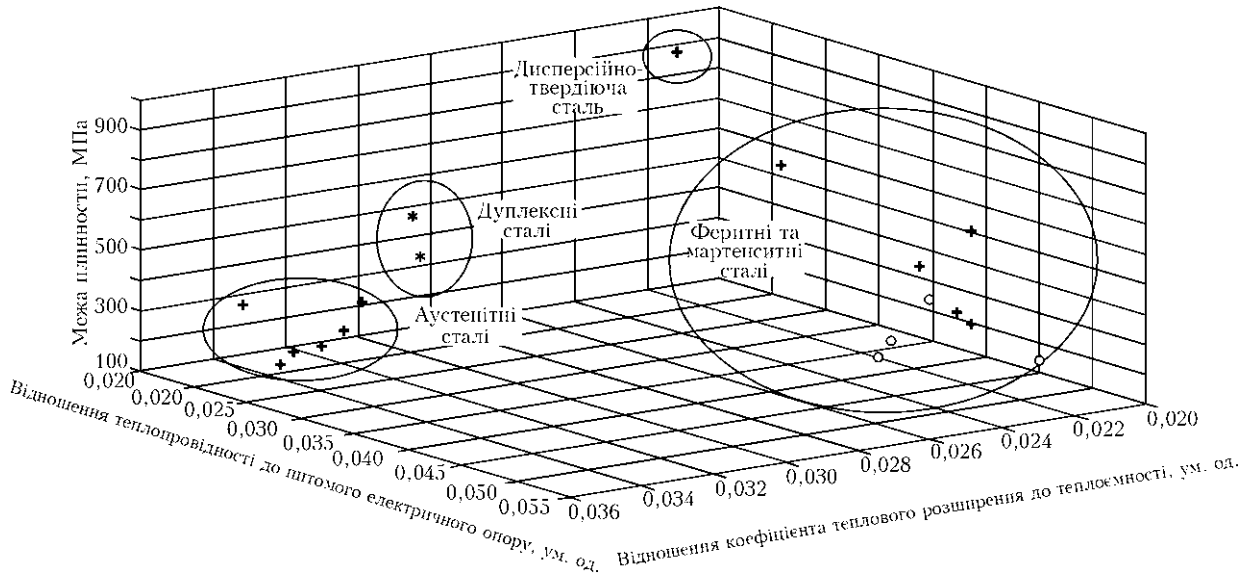


Рис. 1. Розподіл структурних груп сталей за відношеннями теплопровідності до питомого електричного опору та коефіцієнта теплового розширення до теплоємності

групи сталей за значеннями коефіцієнта теплопровідності та питомого електричного опору (рис. 2).

Характерною особливістю показаних розподілів на рис. 1 та 2, є те, що для різних структурних груп різними є діапазони значень межі плинності (як базової механічної характеристики), а також візуальна відмінність залежностей цієї характеристики від інформативних параметрів. Очевидно, що дане явище дозволяє стверджувати, що фізичні властивості сталей (особливо питомий електричний опір та теплопровідність) можуть бути використані як структурно-чутливі, а отже як інформативні для контролю ФМХ сталей.

З метою встановлення залежностей між межею плинності та межею міцності, з одного боку, та твердістю, питомим електричним опором і теплопровідністю, з другого, було вирішено звернутись до нормативних документів на виготовлення

сталей. На жаль, у вітчизняних джерелах [6] відомості про механічні та фізичні характеристики щодо основних конструкційних сталей носять неоднозначний характер — вказується діапазон значень того чи іншого параметра, а не конкретне число; щодо деяких фізичних параметрів відомості взагалі відсутні. Тому було використано відомості щодо ряду зі 142 іноземних марок сталей [7], які були вибрані з різними типами структур: 1) аустенітні (вибрано 88 марок); 2) феритні (вибрано 12 марок); 3) дуплексні (вибрано 26 марок); 4) мартенситні (вибрано 16 марок).

Для вказаних сталей згідно з системою нормативних документів серії ASTM нормуються такі величини: межа міцності, межа плинності, твердість, густина, коефіцієнт теплового розширення, теплопровідність, теплоємність і питомий електричний опір.

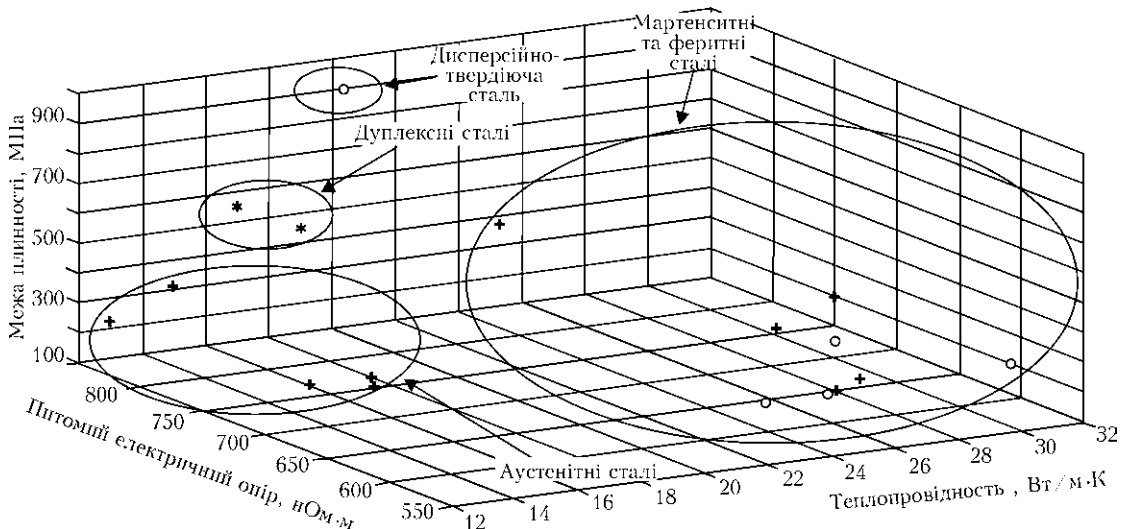


Рис. 2. Розподіл структурних груп сталей за значеннями питомого електричного опору та теплопровідності

Таблиця 1. Результати розрахунку коефіцієнта K

Структура сталей	Середнє значення коефіцієнта $K \cdot 10^{-6}$, ум.од	Діапазон значень коефіцієнта $K \cdot 10^{-6}$, ум.од
Аустенітна	12,05	9,9...13,6
Дуплексна	12,55	11,8...13,6
Мартенситна	15,45	13,7...18,0
Феритна	15,72	14,0...17,7

Наведемо діапазони зміни вибраних параметрів: межа міцності 400...2200 МПа; межа плинності 145...1800 МПа; твердість HV_{140} ...332; теплопровідність 9,1...32,3 Вт/м·К; питомий електричний опір 500...1450 нОм·м.

Неоднозначність характеру залежностей вказаних параметрів наштовхнула на припущення про структурну чутливість цих параметрів та можливість дослідження взаємозв'язку мікроструктури із механічними характеристиками. Відомості щодо досліджуваних марок сталей також містили і тип їх мікроструктури (мартенситна, феритна, аустенітна та дуплексна). Далі, відповідно до раніше запропонованого підходу [12], було запропоновано розрахувати деякий усереднений коефіцієнт K для всіх марок сталей для кожної структури окремо за формулою:

$$K = \rho \lambda, \quad (1)$$

де ρ — питомий електричний опір, Ом·м; λ — коефіцієнт теплопровідності, $\frac{\text{Вт} \cdot \text{м}}{\text{К}}$.

Таким чином, розмірність даного коефіцієнта $\frac{\text{Вт} \cdot \text{Ом}}{\text{К}}$.

Введення коефіцієнта має за мету дослідити можливість якісної оцінки структури контрольованих сталей. Результати розрахунку введеного коефіцієнта K наведено в табл. 1.

Як видно з табл. 1, значення коефіцієнта K відрізняється для різних типів структури сталей. Причому найбільше абсолютне значення даного коефіцієнта відповідає феритним сталям, а найменше — аустенітним. Проте чітко ідентифікувати приналежність певної марки сталі до тієї чи іншої

структури можна тільки для двох груп сталей. До першої належать аустенітні та дуплексні сталі, до другої — мартенситні та феритні сталі.

Про взаємозв'язок електропровідності та теплопровідності металів було відомо давно [5], що пояснюється тим, що обидві ці властивості металів зумовлені, в основному, рухом електронів провідності. Проте, закон Відемана—Франца виконується тільки для чистих металів і його не можна використовувати для сталей, які є складною механічною сумішшю заліза, вуглецю та легуючих елементів.

Різниця в розрахованих значеннях введеного коефіцієнта K для різних структур наштовхнула на думку про доцільність застосування додаткових методів оброблення інформації для встановлення наявності взаємозв'язку між механічними характеристиками (межею плинності та межею міцності) та вибраними параметрами для всіх типів структур окремо.

Значення коефіцієнтів кореляції між досліджуваними параметрами розраховані в середовищі MATLAB 7.3.0 для всіх типів структур і подані в табл. 2.

Аналіз одержаних коефіцієнтів кореляцій показав, що:

- коефіцієнти кореляції досліджуваних параметрів для окремих типів структур (за винятком мартенситних сталей) в цілому виявилися кращими за коефіцієнти кореляції для всіх марок сталей разом;

- знак « \leftrightarrow » свідчить про те, що залежність коефіцієнта теплопровідності від межі міцності, межі плинності є обернено пропорційною;

- найкраща кореляція коефіцієнта теплопровідності і питомого електричного опору з межею міцності/плинності та твердістю спостерігається для феритних та дуплексних сталей;

- загалом невисокі значення коефіцієнтів кореляції можуть пояснюватися нелінійністю взаємозв'язків між досліджуваними параметрами.

Враховуючи те, що вказана нелінійність пояснюється сумісним та нерівномірним впливом багатьох чинників, доцільно застосовувати алгоритми штучних нейронних мереж (ШНМ) для вирішення задачі багатопараметрової апроксимації

Таблиця 2. Коефіцієнти кореляції досліджуваних параметрів для досліджуваних мікроструктурних груп сталей

Структурна група	Кореляція			
	між теплопровідністю та межею плинності	між теплопровідністю та межею міцності	між питомим електричним опором та межею плинності	між питомим електричним опором та межею міцності
Всі структурні групи	-0,1344	-0,0379	-0,1381	-0,0532
Аустенітна	-0,1241	-0,1813	0,2901	0,3748
Дуплексна	-0,6820	-0,6848	0,7597	0,7294
Феритна	-0,6939	-0,7404	0,8034	0,8248
Мартенситна	0,0238	0,0204	0,2335	0,2119



Таблиця 3. Результати тестування нейронної мережі

Набір даних	Номер сталевого зразка								Похибка тестування	
	1	2	3	4	5	6	7	8	абсолютна, МПа	відносна, %
Дійсні значення межі плинності	275	310	485	280	450	275	350	560	—	—
1-й: реальні виходи нейронної мережі	271	313	492	283	430	—	—	—	2,3	1,04
2-й: реальні виходи нейронної мережі	—	—	—	—	—	273	384	562	11,6	4,01
3-й: реальні виходи нейронної мережі	276	316	483	273	379	422	345	478	40,1	19,1

межі плинності/міцності від таких інформативних параметрів, як коефіцієнт теплопровідності, твердість та питомий електричний опір. Детально про можливість та доцільність застосування алгоритмів штучних нейронних мереж вказувалося раніше [8].

З усіх марок сталей було сформовано три окремих набори тренувальних та тестових даних:

- 1-й набір включає аустенітні та дуплексні сталі (кількість марок для тренування мережі — 90, для тестування — 5);
- 2-й набір включає феритні та мартенситні сталі (кількість марок для тренування мережі — 37, для тестування — 3);
- 3-й набір включає сталі всіх типів структур (кількість марок для тренування мережі — 127, для тестування — 8);

Необхідно зазначити, що згідно із прийнятою практикою [9], тестування нейронних мереж виконують на даних, що не використовувались під час навчання (невідомі для нейронної мережі) — таким чином забезпечується об’єктивність судження про здатність мережі до апроксимації необхідної функції та відповідає умовам контролю.

Підготовка даних (як вхідних, так і вихідних) здійснювалась за стандартною процедурою нормування для одержання значень параметрів у межах (0 1). Як тренувальний алгоритм, в усіх мережах використовували алгоритм Левенберга–Марквардта [8], який використовується для тренування невеликих мереж і характеризується швидким сходженням. Нейронна мережа заданої будови тренувалась для розв’язання задачі апроксимації межі плинності як функції двох інформативних параметрів (питомого електричного опору та коефіцієнта теплопровідності).

Шляхом проведення тренувань та тестувань нейронних мереж різних архітектур, визначено, що найкраще здатною до апроксимації виявилася ШНМ з архітектурою 20×10×1. Ця архітектура означає, що в першому прихованому шарі міститься 20 нейронів, у другому — 10, у вихідному — 1. Результати тестування натренованих мереж для трьох наборів даних наведено в табл. 3.

За результатами, наведеними в табл. 3, можемо зробити такі висновки:

1) використання штучних нейронних мереж дозволяє встановлювати взаємозв’язки між інформативними параметрами (теплопровідність, питомий електричний опір) та досліджуваними характеристиками (межа плинності) за низьких значень коефіцієнтів кореляції між ними;

2) визначення ФМХ сталей в межах груп із однаковою або схожою структурами дозволяє суттєво підвищити точність визначення ФМХ, що узгоджується із відомим зв’язком між структурним станом сталей та їх механічними характеристиками;

3) отримані результати підтверджують вибір інформативних параметрів контролю — теплопровідності та питомого електричного опору, структурна чутливість яких була обґрунтована раніше.

Таким чином, в результаті проведених досліджень розроблено метод визначення механічних характеристик, суть якого полягає у виконанні наступних етапів:

- визначення за відношенням теплопровідності до електропровідності (згідно закону Відемана–Франца) до якої групи за мікроструктурою належить той чи інший матеріал;

- в межах структурної групи визначаються ФМХ (наприклад, межа плинності) шляхом врахування комплексу інформативних параметрів — твердості, теплопровідності та питомого електричного опору з використанням штучних нейронних мереж.

У подальшому на цьому підґрунті було розроблено два нових методи визначення ФМХ сталей, що дозволяли визначати межу плинності та межу витривалості шляхом:

- сумісного вимірювання теплопровідного інформативного параметру та твердості [10];

- вимірювання питомого електричного опору чотирьохконтактним методом та твердості [11].

В результаті проведеної роботи було досягнуто можливості вимірювання фізичних властивостей на реальних зразках металоконструкцій обмежених розмірів, що постало базою для подальших досліджень.



Експериментальна перевірка залежності мікроструктури від запропонованих інформативних параметрів (питомий електричний опір та теплопровідність) проводили шляхом дослідження, що передбачало послідовне визначення мікроструктури сталевих зразків, визначення неруйнівними методами твердості, теплопровідності та питомого електричного опору.

Метою термічного оброблення зразків є отримання експериментальних зразків, що мають різні мікроструктури для встановлення закономірностей інформативних параметрів НК від зміни мікроструктури сталей.

Із великогабаритного сталевого листа (матеріал — сталь 45) за допомогою гільйотини було вирізано три зразки розмірами: довжина — 280 мм, ширина — 180 мм, товщина — 10 мм та три зразки-свідки розмірами: довжина — 90 мм, ширина — 60 мм, товщина — 10 мм. Один повнорозмірний зразок та один зразок-свідок залишені в стані поставки. Інші повнорозмірні зразки та відповідні їм зразки-свідки з метою зміни структури пройшли наступні режими термічної обробки:

- відпал 820...840 °С (витримка 20...30 хв; охолодження в печі);
- загартовання 820...840 °С (витримка 20...30 хв; охолодження у воді або оливі).

Повнорозмірний зразок та зразок-свідок у стані поставки промарковані клеймом «0», відпалений зразок та відповідний йому зразок-свідок — клеймом «1», загартований зразок та відповідний йому зразок-свідок — клеймом «2».

З метою визначення мікроструктури термооброблених повнорозмірних зразків було проведено металографічні дослідження на відповідних зразках-свідках.

Для вивчення мікроструктури термооброблених зразків було використано мікроскоп серії MT8500 з високоякісною оптичною системою MEIJI TECHNO Planachromat Epi ICOSTM, скоректованою на «безкінечність» (рис. 3).

Наявність можливих дефектів (тріщин) термічного оброблення на зразках перевірялася за допомогою УЗ дефектоскопа УД2-70 та ДІО-562. Методика акустичної дефектоскопії передбачала проведення попереднього настроювання УЗ апаратури на зразках зі штучними дефектами.

Далі передбачалось, що за значенням добутку виміряних значень коефіцієнта теплопровідності та питомого електричного опору визначається

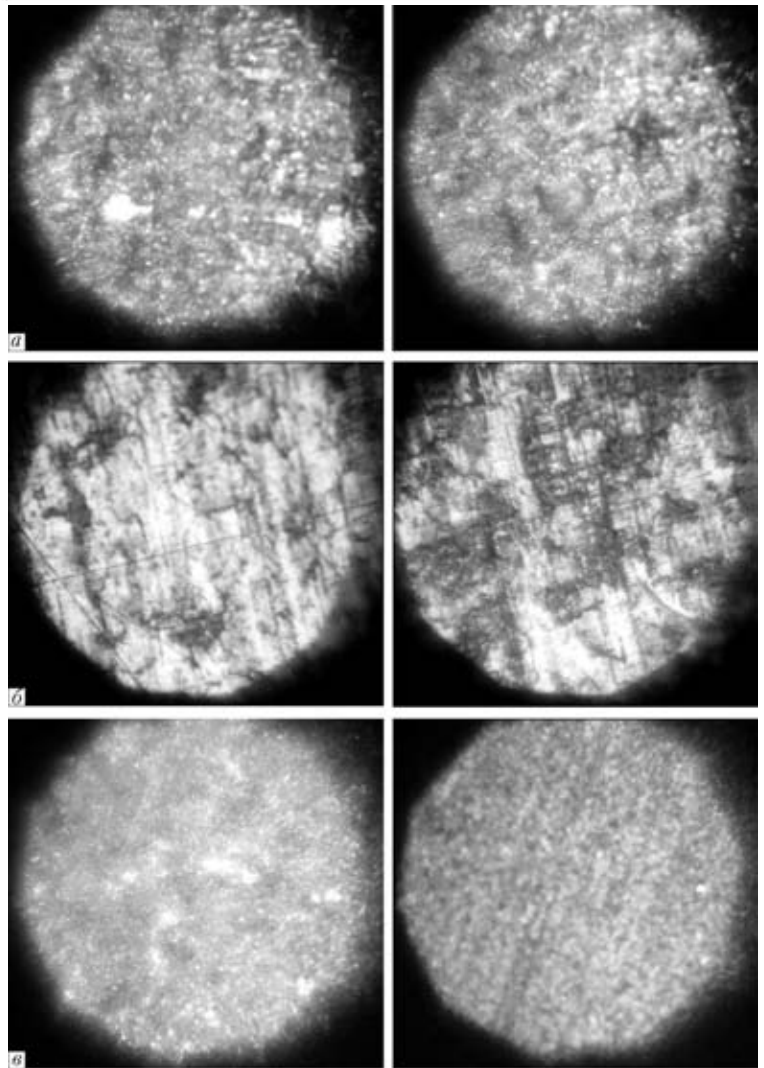


Рис. 3. Мікроструктурні зображення шліфів у стані поставки (а), відпаленому (б) та загартованому станах (в), отримані за допомогою мікроскопа серії MT8500

приналежність марки сталі до того чи іншого типу структури.

Всі зразки поділені на шість зон розміром 90×90 мм. Вибір розмірів ділянок зумовлений габаритами перетворювачів коерцитиметра, індуктометра та лабораторної установки для вимірювання теплопровідного параметра, а їх кількості — з міркувань отримання адекватних статистичних оцінок результатів вимірювань, врахування та зменшення впливу крайових ефектів, а також можливої структурної анізотропії. В кожній зоні на всіх зразках для забезпечення адекватності результатів досліджень буде проведено семикратні вимірювання всіма технічними засобами.

На відібраних трьох термооброблених повнорозмірних зразках (в стані поставки, відпалений та загартований) зі сталі 45 було проведено вимірювання з метою визначення наступних інформативних параметрів: теплопровідна характеристика, твердість, коерцитивна сила, індуктивний параметр та електричний опір. Вимірювання ін-

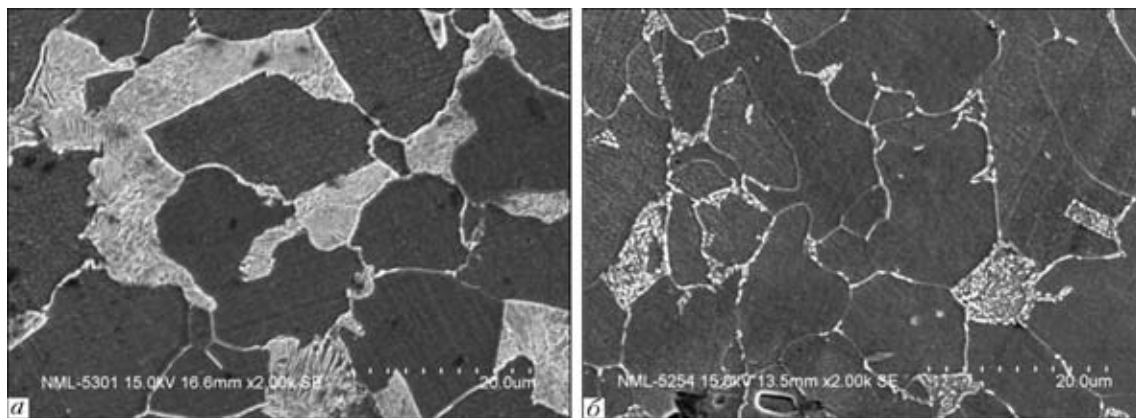


Рис. 4. Різні типи мікроструктур трубних сталей: а — феритно-перлітна; б — феритна структура

формативних параметрів (окрім електричного опору) проводилися в кожній із шести зон.

Усереднені результати вимірювань інформативних параметрів на повнорозмірних термооброблених зразках наведені в табл. 4.

Раніше встановлено, що належність зразка сталі до певного типу мікроструктури можна визначити за формулою (1).

Тепер згідно з запропонованим методом зробимо спробу визначити мікроструктуру термооброблених зразків (в стані поставки, відпалений та загартований). При цьому замість питомого електричного опору використаємо значення електричного опору R , а замість коефіцієнта теплопровідності — теплопровідний параметр T , який залежить від фактичних значень теплопровідності. Вираз (1) можна переписати наступним чином:

$$K = RT. \quad (2)$$

Підставляючи значення для R і T з табл. 4 у вираз (2), одержимо значення коефіцієнта K для трьох сталевих зразків, що мають різні мікроструктури:

- в стані поставки $K = 14,203$ ум.од;
- у відпаленому стані $K = 14,224$ ум. од;
- у загартованому стані $K = 16,018$ ум.од.

Аналогічна ситуація спостерігалась на зразках трубних сталей, що досліджувались з метою виявлення залежності між теплопровідною характеристикою [12] та питомим електричним опором [13] із межею плинності трубних сталей. Наприклад, значення добутку питомого електричного опору та теплопровідної характеристики суттєво відрізняються для феритно-перлітної та феритної структури на різних зразках до 30 %. Зображення двох типових мікроструктур, отриманих у співпраці із Національною металургійною лабораторією (м. Джамшедпур, Індія) показані на рис. 4.

Таким чином, згідно із запропонованим методом, встановлено можливість чіткої якісної ідентифікації мікроструктур сталей за значеннями

Таблиця 4. Результати експериментальних досліджень на термооброблених зразках

Інформативний параметр	Середнє значення інформативного параметра зразка		
	в стані поставки	відпаленого	загартованого
Твердість, HB	156	132	422
Теплопровідний параметр, ум. од	6,310	6,522	6,557
Електричний опір, мОм	2,251	2,181	2,443

питомого електричного опору та теплопровідності, що було запропоновано за результатами теретичних досліджень.

Висновки

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість ідентифікації мікроструктури сталей за допомогою комплексу інформативних параметрів — теплопровідності та питомого електричного опору, які у сукупності зі значенням твердості дозволяють визначати неруйнівним способом значення механічних характеристик.

Потребує наукового обґрунтування та глибокого дослідження явище залежності сумісної залежності теплопровідності та питомого електричного опору сталей від їх мікроструктури з матеріалознавчої точки зору.

Запропонований метод потребує подальшого розвитку з позицій переходу до кількісної оцінки мікроструктурного стану сталей та встановлення наявності та характеру залежностей у багатовимірному просторі мікроструктури, механічних характеристик та фізичних властивостей.

Определена зависимость между механическими характеристиками, микроструктурой и информативными параметрами неразрушающего контроля. Предложен метод определения предела текучести и предела прочности путем последовательного измерения теплопроводности, удельного электрического сопротивления, определения



микроструктуры по их значениям и расчета механических характеристик с помощью нейронных сетей.

1. *Оценка прочностного ресурса газопроводных труб с коррозионными повреждениями: Уч. пособ. / И. Н. Бирилло, А. Я. Яковлев, Ю. А. Теплинский и др. // Под ред. И. Ю. Быкова. — М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. — 168 с.*
2. *Постанова Кабінету Міністрів України від 8 жовтня 2004 р. № 1331 «Про затвердження Державної науково-технічної програми «Ресурс» (<http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?inreg=1331-2004-%EF>).*
3. *Быков И. Ю., Цхадая Н. Д. Эксплуатационная надежность и работоспособность нефтегазопромысловых и буровых машин. — М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2010. — 304 с.*
4. *Карпаш О. М., Молодецкий И. А., Карпаш М. О. Общий обзор методов оценки физико-механических характеристик металлов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 2. — С. 18–22.*
5. *Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. — В 2 т. Т 1. — М.: Мир, 1979. — 420 с.*
6. *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.*
7. <http://www.matweb.com>
8. *Карпаш М. О. Обґрунтування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металокопункцій // Методи та прилади контролю якості. — 2004. — № 12. — С. 30–33.*
9. *Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. — М.: Вильямс, 2006. — 1104 с.*
10. *Розроблення методу та засобу визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металокопункцій довготривалої експлуатації / Автореф. дис... канд. техн. наук / М. О. Карпаш; Нац. ун-т «Львів. політехніка». — Л., 2006. — 20 с.*
11. *Контроль механических характеристик конструктивных сталей за їх питомим електричним опором / Автореф. дис... канд. техн. наук // Є. Р. Доценко; Івано-Франк. нац. техн. ун-т нафти і газу. — Івано-Франківськ, 2006. — 20 с.*
12. *Застосування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик нафтогазового обладнання / М. О. Карпаш, І. С. Кісіль, О. М. Карпаш, І. А. Молодецький // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2006. — № 2. — С. 49–52.*
13. *Доценко С. Р., Карпаш М. О., Карпаш О. М. Дослідження методу визначення напруження плинності конструкційних сталей за значеннями їх питомого опору // Методи та прилади контролю якості. — 2010. — № 24. — С. 105–111.*

*Надійшла до редакції
01.06.2012*

НОВАЯ КНИГА

Неразрушающий контроль в Украине: Справочник / Под ред. В. А. Троицкого и Ю. Н. Посьпайко. — Киев: Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики, 2012. — 144 с.

Приведены сведения об организациях Украины, связанных с использованием физических методов неразрушающего контроля (акустических, радиационных, электромагнитных, проникающих веществ и др.) для оценки качества материалов и ответственных сооружений, о предприятиях, изготавливающих и поставляющих приборы, материалы и оборудование для дефектоскопии и технической диагностики, осуществляющих подготовку и сертификацию специалистов по неразрушающему контролю, а также о стандартизации и метрологии в области неразрушающего контроля. Приведена информация об Украинском обществе неразрушающего контроля и технической диагностики, итогах профессиональных конкурсов, научных конференциях, практических семинарах и других мероприятиях, которые проводятся в Украине для пропаганды физических методов неразрушающего контроля качества ответственных сооружений.

По вопросу приобретения справочника просьба обращаться в редакцию журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»