



## ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО ПІДХОДУ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАФТОГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ

М. О. КАРПАШ, І. С. КІСІЛЬ, О. М. КАРПАШ, І. А. МОЛОДЕЦЬКИЙ

*Розглянуто використання методу сумісного вимірювання кількох параметрів (теплопровідної характеристики і твердості) для визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій в нафтогазовій галузі. Наведено результати порівняльних досліджень щодо встановлення характеру залежності різних параметрів неруйнівного контролю (включаючи теплопровідну характеристику та твердість) від межі текучості матеріалу насосно-компресорних труб.*

*The problems of usage of the combined measurement method of several material parameters set (hardness and thermal conductive parameter) for evaluation of mechanical properties of metalwork material. The results of comparative investigations on establishment of dependence between several non-destructive parameters (including hardness and thermal conductive parameter) and yield strength of the lifting pipe material are given.*

Питання визначення фізико-механічних характеристик (ФМХ) труб нафтового сортаменту є важливим з огляду на їх вартість, що складає до 30 % вартості всього встановленого на свердловині [1] обладнання та потенційну небезпеку у випадку їх поломки чи відмови. Для правильного компонування насосно-компресорної колони необхідно забезпечити відповідність ФМХ кожної труби встановленим вимогам. На даний час визначення цих характеристик труб не здійснюється, а існуючі спеціалізовані прилади [2] забезпечують тільки їх розбракування по групам міцності. В залежності від границі текучості матеріалу труби нафтового сортаменту поділяють на групи міцності Д, К, Е, Л, М, Р, Т [3]. Для труб нафтового сортаменту основною фізико-механічною характеристикою є границя текучості їх матеріалу, тому в подальшому розглядатиметься саме вона.

Попередньо авторами [4, 5] запропонований новий підхід до визначення ФМХ сталей, який ґрунтується на комплексному врахуванні кількох параметрів (твердості, теплопровідності, питомого електричного опору) неруйнівного контролю (НК) із застосуванням нейронних мереж. Питомий електричний опір було вирішено виключити з розгляду через труднощі, пов'язані із точними вимірюваннями цього параметра для феромагнітних сталей в умовах експлуатації металоконструкцій. Для експериментальної перевірки отриманих теоретичних положень розроблено та виготовлено спеціалізований прилад [6]. Він забезпечує реєстрацію зміни температурного поля на поверхні об'єкта контролю (із дискретністю 1 с) при одночасному нагріві джерелом, вимірювання твердості — за допомогою серійного твердоміра типу ТДМ-1, а також в приладі передбачена можливість реалізації алгоритму обробки результатів вимірювань за допомогою штучних нейронних мереж. Вимірювання здійснюються за допомогою лінійки шести напівпровідникових терморезистивних давачів (точність

$\pm 0,25$  °С в діапазоні температур 20...100 °С). Як джерело інтенсивного нагріву використовується керамічний інфрачервоний нагрівач виробництва фірми Salamander [7]. Переваги використовуваного нагрівача: високий коефіцієнт корисної дії (до 96 %), потужність в 1000 Вт, безконтактність нагріву, невеликі розміри (в корпусі — 280×110×120 мм), швидкий вихід на робочий режим нагріву (до 5 хв). В ході попередніх досліджень виділено інформативний параметр — площа чотирикутника, утвореного внаслідок певної побудови на графічному представленні залежності зміни температури від часу (далі — теплопровідна характеристика). Цей параметр вимірюється з допомогою розробленого технічного засобу.

*Метою даної роботи є порівняльні випробування відомих методів визначення ФМХ металоконструкцій та пропонованого, а також встановлення характеру залежності між інформативними параметрами та ФМХ насосно-компресорних труб.*

Методика проведення експериментальних досліджень полягала в наступному. Відібрано 13 зразків із насосно-компресорних труб із попередньо визначеними в заводських лабораторіях ФМХ згідно ГОСТ 10006–80. Діапазон вказаних значень границі текучості відібраних зразків — 320...760 МПа (табл. 1, графа 2). Товщина стінки усіх зразків — 5,5 мм, діаметр — 73 мм.

Для порівняльного аналізу було вирішено проводити вимірювання з використанням наступних технічних засобів: твердоміра динамічного типу ТДМ-1 (зав. № 690, НВФ «Ультракон-Сервіс», м. Київ) — рис. 1, а); коерцитиметра КРМ-ЦК (зав. № 3006, НВФ «Спеціальні Наукові Розробки», м. Харків) — рис. 1, б); прилад для визначення ФМХ труб нафтового сортаменту СІГМА-Т10.1 (НВФ «Зонд», м. Івано-Франківськ) — рис. 1, в); розроблений прилад ФМХ-1 — рис. 1, г).

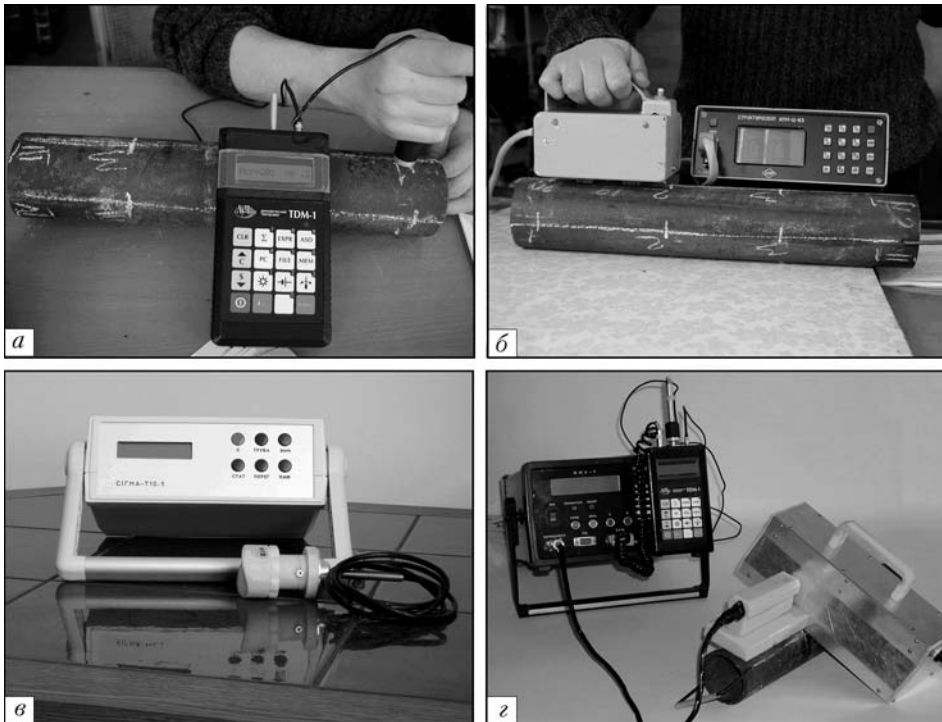


Рис. 1. Технічні засоби, що були використані в ході досліджень

Таблиця 1. Результати досліджень

Номер зразка	Границя текучості $\sigma_T$ , МПа	Твердість по шкалі Брінеля $HВ$	Коерцитивна сила $H_c$ , А/м	Покази приладу СИГМА-Т10.1 $S$ , МПа	Техно-провідна характеристика $M$ , ум. од. $\cdot 10^{-3}$
1	320	169,5	2,59	571,8	31,86
2	470	219,4	7,46	559,6	29,90
3	490	201,3	5,86	574,8	30,58
4	581	203,1	8,43	574,7	31,10
5	588	206,8	7,76	568,9	29,44
6	600	211,1	9,28	656,6	29,78
7	600	227,5	6,73	616,9	31,00
8	610	199,1	9,64	564,2	29,17
9	629	226,6	12,50	590,8	30,80
10	668	237,7	10,85	662,3	27,68
11	682	240,3	7,49	671,5	26,52
12	700	261,8	8,34	633,5	29,20
13	760	270,0	7,36	622,3	27,29

Таблиця 2. Коефіцієнти кореляції

	$HВ$	$H_c$	$S$	$M$	$\sigma_T$
$HВ$	1	0,388	0,607	-0,685	0,857
$H_c$		1	0,267	-0,287	0,624
$S$			1	-0,639	0,608
$M$				1	-0,721
$\sigma_T$					1

Для зменшення впливу різних факторів (анізотропії матеріалу зразків, шорсткості поверхні та ін.) на результати вимірювань кожен зразок був розмічений на 12 точок (на перетині чотирьох твірних та трьох поперечних січень). В кожній точці виконано п'ятикратні вимірювання всіма

приладами, вказаними вище. Вимірювання проводили в однакових лабораторних умовах.

Осереднені результати вимірювань представлені в табл. 1.

Таблиця значень коефіцієнтів кореляції між вимірними параметрами (твердістю  $HВ$ , коерцитивною силою  $H_c$ , показами приладу СИГМА-Т10.1  $S$ , показами приладу ФМХ-1  $M$ ) та границею текучості  $\sigma_T$  приведені в табл. 2.

З табл. 2 видно, що кращі коефіцієнти кореляції з границею текучості є для твердості та теплопровідної характеристики. Знак мінус для теплопровідної характеристики вказує на обернено пропорційну залежність цього параметра від границі текучості. Загалом коефіцієнти кореляції не досягають високих значень (більше 0,9), що може вказувати на не лінійність взаємозв'язків

між даними параметрами НК та границею текучості та на необхідність врахування кількох параметрів одночасно. Тим більше, кореляційний аналіз дає можливість встановити тільки наявність чи відсутність залежності між досліджуваними параметрами, а не оцінити її характер.

Тому метою подальших досліджень було встановлення оптимальної комбінації вимірюваних параметрів, яка б забезпечувала найбільш точне визначення границі текучості. Для вирішення цієї задачі використано алгоритми штучних нейронних мереж [8]. Нейронна мережа заданої будови тренувалась для вирішення задачі апроксимації границі текучості як функції двох, трьох чи всіх чотирьох вимірюваних параметрів. Шляхом порівняння тестових виходів натренованих нейронних мереж мож-



на визначити оптимальну комбінацію вимірюваних параметрів. Критеріями відбору служать: мінімальна кількість вхідних параметрів, найкращий результат визначення границі текучості та мінімальна середня похибка. Кількість вхідних параметрів вказує на кількість різних технічних засобів, якими необхідно проводити вимірювання. Кращий результат дозволяє оцінювати здатність мережі максимально точно вирішувати задачу апроксимації функції границі текучості. Оціночна середня похибка розраховується як середнє значення абсолютної похибки визначення границі текучості по всім дев'ятьом мережам для конкретної комбінації параметрів. Вона вказує на характер загальної тенденції мереж до сходження при тренуванні для конкретної комбінації вхідних параметрів — чим менша така похибка, тим краще сходиться алгоритм тренування, а отже і взаємозв'язки між вхідними та вихідним параметрами більш стійкі.

Із чотирьох вимірюваних параметрів ( $HB$ ,  $H_c$ ,  $S$ ,  $M$ ) було сформовано набори по два, три та чотири параметри — загалом 11 можливих комбінацій.

Набір із 13 зразків труб був розділений на дві групи: *тренувальну* — результати вимірювань по 11 зразкам використовували для тренування нейронних мереж; *тестову* — результати вимірювань двох зразків пп. 1 та 4 з табл. 1, які не використовувались для тренування нейронних мереж і служили для тестування натренованих мереж.

Для кожної комбінації вхідних параметрів було здійснено тренування дев'яти нейронних мереж трьох різних архітектур (по три мережі з однаковою будовою):

Кількість вхідних параметрів	Архітектура		
2	10×1	12×1	16×1
3	12×3×1	21×6×1	24×12×1
4	20×4×1	24×8×1	24×125×4×1

*Примітка.* Архітектура 20×4×1 означає, що в першому прихованому шарі міститься 20 нейронів, в другому — 4, у вихідному — 1.

Підготовку даних (як вхідних, так і вихідних) проводили за стандартною процедурою нормування для отримання значень параметрів в межах [0 1].

Як тренувальний алгоритм, у всіх мережах брали алгоритм Левенберга–Марквардта [9], який використовується зазвичай для тренування невеликих мереж і характеризується швидким сходженням.

Необхідно відмітити, що вибір архітектури нейронних мереж, підготовки даних, вибору тестових наборів та тренувальних алгоритмів здійснюється на базі досвіду дослідника [9] і залежить від природи та складності поставленої задачі, а також об'єму наявних статистичних даних.

Після проведення тестувань натренованих нейронних мереж для кожної комбінації вхідних параметрів було отримано результати, які було оформлено в табл. 3 для аналізу згідно встановлених критеріїв. В таблиці виділені найбільш оптимальні

Таблиця 3. Порівняльна таблиця для вибору оптимальної комбінації параметрів

Номер	Кількість вхідних параметрів	Вхідні параметри	Кращий результат, МПа	Оціночна середня похибка, МПа
1	2	$HB, H_c$	31,1	67
2		$HB, S$	10,2	38,7
3		<b><math>HB, M</math></b>	<b>11,6</b>	<b>30,7</b>
4		$H_c, S$	45,3	66,4
5		$H_c, M$	24,5	45,5
6		$S, M$	9,9	40,5
7	3	$HB, H_c, S$	25,8	49,1
8		$HB, H_c, M$	24,9	69,6
9		<b><math>HB, S, M</math></b>	<b>2,6</b>	<b>24,4</b>
10		$H_c, S, M$	12,5	52,4
11	4	<b><math>HB, H_c, S, M</math></b>	<b>7,6</b>	<b>41,8</b>

*Примітка.* Кращий результат — мінімальне середнє значення абсолютної похибки визначення границі текучості для вказаної комбінації вхідних параметрів (вибирається одна мережа із 9). Оціночна середня похибка — середнє значення абсолютної похибки визначення границі текучості по всім мережам для вказаної комбінації вхідних параметрів. Результати визначення границі текучості усіма мережами були отримані при їх тестуванні.

комбінації для різних кількостей вхідних параметрів за вибраними критеріями. Після застосування першого критерію оптимальності (мінімальна кількість вхідних параметрів) та згідно критерію кращого результату оптимальними можуть вважатись комбінації ( $HB, S$ ), ( $HB, M$ ), ( $S, M$ ). При цьому відмінності між кращими результатами для цих трьох комбінацій не є суттєвими. Якщо ж застосувати критерій мінімальної середньої похибки, то найбільш оптимальним вибором буде комбінація ( $HB, M$ ) — твердість та теплопровідна характеристика.

Таким чином, в натренованій нейронній мережі в неявному виді міститься залежність границі текучості від твердості та теплопровідної характеристики. Записати цю залежність аналітично можливо, але вона матиме громіздкий запис, що зробить її аналіз практично неможливим. Тому авторами був розроблений спосіб графічного представлення так званої «поверхні рішення», яка була згенерована мережею в ході її тренування. На рис. 2 представлена така поверхня для нейронної мережі, яка дала найкращий результат для вибраної оптимальної комбінації параметрів.

Аналізуючи результати, представлені в табл. 3, можемо сказати, що включення коерцитивної сили до комплексу вхідних параметрів погіршує результати тестування, що може бути пов'язане із сильною анізотропією даної характеристики та можливим впливом факторів, які не були враховані в ході проведення досліджень; збільшення кількості вхідних параметрів не завжди сприяє більш точному визначенню вихідного параметра: при збільшенні кількості параметрів від двох (пп. 2 та 3 табл. 3) до трьох (п. 9 табл. 3) результати покращились, а при збільшенні до чотирьох параметрів (п.11 табл. 3) — погіршилися. Хоча при порівнянні пп. 2, 3 із п.11 покращення

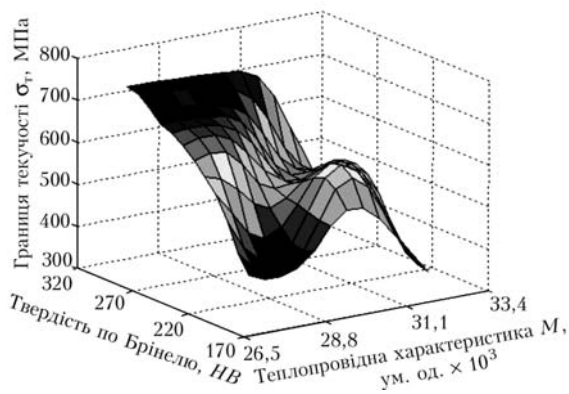


Рис. 2. Поверхня рішення, згенерована нейронною мережею

результатів очевидне і пояснюється збільшенням інформації про даний матеріал, що дає змогу із більшою достовірністю оцінювати його механічні характеристики.

Якщо відкинути перший критерій оптимальності (мінімальна кількість вхідних параметрів), то з табл.3 видно, що найкращою комбінацією вхідних параметрів для визначення границі текучості є комплекс даних — твердість, теплопровідна характеристика та покази приладу СІГМА-Т10.1. Основною проблемою в даному випадку постає налаштування приладу СІГМА-Т10.1, оскільки для цього необхідно мати велику кількість зразків.

На рис. 2 представлена так звана «поверхня рішення», згенерована мережею. З рисунка видно, що границя твердості прямо пропорційно залежить від твердості і обернено пропорційно від теплопровідної характеристики, що підтверджується знаками перед коефіцієнтами кореляції в табл. 2. Складний характер отриманої поверхні рішення свідчить про нелінійність взаємозв'язків між границею текучості та вхідними параметрами — таке заключення підтверджується тим, що коефіцієнти кореляції в табл. 2 не приймали значення дуже близькі до одиниці, адже стандартний алгоритм розрахунку коефіцієнтів кореляції передбачає наявність лінійної залежності між досліджуваними параметрами. Також необхідно відмітити, що складність отриманої поверхні рішення підтверджує доцільність застосування нейронних мереж для вирішення задачі нелінійної багатопараметрової апроксимації.

## Висновки

Метод сумісного врахування кількох параметрів (твердості та теплопровідної характеристики) може бути використаний для визначення границі текучості матеріалу насосно-компресорних труб із достатньою точністю (похибка 2,6 %).

Взаємозв'язки комплексу вибраних параметрів та границі текучості мають складний нелінійний характер і можуть бути апроксимовані так званою «поверхнею рішення», згенерованою відповідною нейронною мережею.

Застосовані в роботі підходи до вибору параметрів та встановлення характеру взаємозв'язків між цими параметрами та механічними характеристиками є універсальними і можуть бути застосовані в інших галузях НК.

*Рассмотрены вопросы применения метода совместного измерения нескольких параметров (теплопроводной характеристики и твердости) для определения физико-механических свойств материала металлоконструкций. Приведены результаты сравнительных исследований по установлению характера зависимости различных параметров неразрушающего контроля (включая теплопроводную характеристику и твердость) от предела текучести материала насосно-компрессорных труб.*

*Целью данной работы являются сравнительные исследования известных методов определения физико-механических свойств металлоконструкций и предлагаемого, а также установление наличия и характера зависимости предела текучести от информативных параметров контроля на примере насосно-компрессорных труб. Предложена и использована методика определения оптимальной комбинации параметров контроля, которая позволяла бы с наибольшей точностью получить предел текучести. Для решения этой задачи использованы алгоритмы нейронных сетей. Руководствуясь критерием минимального количества входных параметров контроля и минимальной ошибки определения предела текучести, удалось выбрать комплекс параметров — твердость и информативный параметр, характеризующий теплопроводность.*

1. *Неруйнівний контроль труб нафтового сортаменту: Навч. підручник / О. Карпаш, П. Криничний, Є. Крижанівський, І. Мигаль, І. Рибич, Я. Зінчак. — Івано-Франківськ: Факел, 2001. — 380 с.*
2. *Криничний П. Я., Молодецький І. А. Прилад для контролю фізико-механічних характеристик труб нафтового сортаменту СІГМА-5Т // Методи та прилади контролю якості. — 1998. — № 2. — С. 9–10.*
3. *Труби нафтового сортаменту: Справ. / 3-е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. А. Е. Сарояна. — М: Машиностроение, 1987. — 420 с.*
4. *Карпаш О. М., Молодецький І. А., Карпаш М. О. Общій обзор методов оценки физико-механических характеристик металлов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 2. — С. 18–22.*
5. *Карпаш М. О. Обґрунтування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій // Методи та прилади контролю якості. — 2004. — № 12. — С. 30–33.*
6. *Карпаш О., Карпаш М., Кісіль І. Прилад для контролю фізико-механічних характеристик металоконструкцій на базі вимірювання кількох параметрів // Тез. 3-й Науч.-практ. конф. «Организация неразрушающего контроля качества продукции в промышленности», 30 апреля–7 мая 2005 г., г. Аланья, Турция. — С. 3–14.*
7. <http://www.InfraredHeaters.com>
8. *Новий підхід до визначення фізико-механічних характеристик сталей неруйнівними методами / О. М. Карпаш, І. А. Молодецький, І. С. Кісіль, М. О. Карпаш // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів: 36. наук. праць. — 2004. — Вып. 9. — С. 80–85.*
9. *Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польск. И. Д. Рудинского. — М.: Финансы и статистика, 2004. — 344 с.*