

Шифр «Церій»

**СТУДЕНТСЬКА НАУКОВА РОБОТА**

на тему:

**«Нейромережевий аналіз в'язко-пластичних  
властивостей конструкційної трубної сталі»**

2020 рік

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ .....	2
ВСТУП. ....	3
1. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ .....	5
1.1. Загальні поняття про нейромережеве моделювання . ....	5
1.2. Створення і навчання нейронної моделі.....	6
2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. ....	9
ВИСНОВКИ.....	15
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ. ....	16

## АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Як показує практика і аналіз досліджень різних авторів, одним із резервів підвищення тріщиностійкості конструкційних сталей при статичних і циклічних навантаженнях є модифікування їх мікродомішками, які містять рідкоземельні елементи, зокрема церій (Ce). Таким чином, виникла необхідність у проведенні додаткових комп'ютерних досліджень, пов'язаних з аналізом експериментальних результатів, відомих із літературних джерел, для оцінки впливу рідкоземельного елемента церія на в'язко-пластичні властивості вуглецевої сталі і визначення його оптимальної концентрації у сталі.

**Мета роботи** – дослідження спільного впливу церія, водню і сірки на в'язко-пластичні характеристики вуглецевої сталі за допомогою нейромережевого аналізу експериментальних результатів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1 – виконати конструювання нейромережевих моделей для аналізу результатів експериментальних досліджень;

2 – провести нейромережевий аналіз спільного впливу церія, сірки і водню на в'язко-пластичні характеристики конструкційної сталі.

**Використана методика досліджень.** Для комп'ютерного моделювання впливу хімічних елементів на в'язко-пластичні властивості конструкційної сталі використовували сучасне програмне забезпечення із застосуванням нейромережевого аналізу експериментальних результатів.

**Результати досліджень.** Аналіз отриманих результатів за допомогою нейромереж дозволив отримати узагальнену діаграму передбачуваних областей високих в'язко-пластичних характеристик вуглецевих сталей, економічно модифікованих мікродобавкою церія, що можуть використовуватися для виготовлення металоконструкцій у промисловості.

**Загальна характеристика роботи.** Робота має актуальність, мету, завдання, використану методику, результати досліджень і їх обговорення, висновки; викладена на **16** сторінках, містить **5** рисунків, **1** таблицю та **7** літературних джерел.

**Ключові слова:** нейромережевий аналіз, сталь 3, церій, в'язкість, пластичність, опір руйнуванню.

## ВСТУП

З аналізу літературних даних [1, 5 – 7] випливає, що вуглецеві сталі, які використовуються для виготовлення трубних конструкцій у нафтогазовій промисловості, є одним із важливих елементів централізованої системи транспорту нафти і нафтопродуктів для технологічних потреб виробничих процесів. Яскравим представником таких сталей є безпосередньо сталь марки 3 (Ст3), яка багато років широко використовується на підприємствах машинобудування і нафтопереробки. Із літератури [1, 7] відомо, що найбільшу небезпеку для безаварійної експлуатації трубопровідної мережі на таких підприємствах представляє корозійна агресивність технологічної суміші, транспортованої по трубах, яка в значній мірі визначається концентрацією сірки і водню.

Відомо [1], що великий вплив на механічні властивості вуглецевої сталі мають гази, зокрема водень. Крім негативного впливу на в'язко-пластичні властивості сталі, водень сприяє утворенню залишкових дефектів у вигляді пор, мікротріщин, гарячих і холодних тріщин, які неминуче знижують її працездатність, в тому числі стійкість проти корозійно-механічних руйнувань.

Таким чином, зниження вмісту водню в металі є необхідною умовою підвищення в'язко-пластичних властивостей, зокрема ударної в'язкості, яка в значній мірі відповідає за експлуатаційний ресурс металевої конструкції.

Як показує практика і аналіз літератури [2, 5 – 7], одним із резервів підвищення тріщиностійкості метала труб промислових систем при статичних і циклічних навантаженнях є модифікування його мікродомішками, зокрема церієм. Особливо це важливо у випадках, коли повністю вичерпаний ресурс підвищення механічних і корозійно-стійких властивостей за рахунок мікролегування традиційно використовуваними елементами, наприклад, нікелем, молібденом, ванадієм, титаном тощо. Тому виникла необхідність у проведенні додаткових комп'ютерних досліджень для оцінки впливу рідкоземельного елемента церія на в'язко-пластичні властивості вуглецевої сталі і визначення його оптимальної концентрації.

Однак, слід відмітити, що різноманітність, великий об'єм експериментального матеріалу та часто невизначеність і суперечливість інформації стосовно в'язко-пластичних характеристик сталей, отриманої за допомогою традиційних методик, призводить до необхідності пошуку нових, альтернативних методів її ефективного аналізу. Задача оцінювання і прогнозування в'язко-пластичних властивостей сталей є ключовою в загальній проблемі управління експлуатаційною надійністю металоконструкцій у нафтогазовій промисловості. Можливості її вирішення полягають у використанні нових інформаційних технологій, складовою частиною яких є інтелектуальні засоби обробки інформації, такі як штучні нейронні мережі (ШНМ). Використання ШНМ дозволяє створювати якісно нові апаратні й програмні засоби, що суттєво розширюють класи розв'язуваних задач і підвищити ефективність аналізу і прогнозування [3, 4].

**Мета роботи** – дослідження спільного впливу церія, водню і сірки на в'язко-пластичні характеристики вуглецевої сталі за допомогою нейромережевого аналізу експериментальних результатів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1 – виконати конструювання нейромережевих моделей для аналізу результатів експериментальних досліджень;

2 – провести нейромережевий аналіз спільного впливу церія, сірки і водню на в'язко-пластичні характеристики конструкційної сталі.

## 1. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1. Загальні поняття про нейромережеве моделювання

За інструментальне середовище для моделювання інтерфейсу вибрана система MATLAB (MATrix LABoratory – матрична лабораторія), яка розроблена спеціалістами Math Works Inc і представляє собою мову програмування високого рівня для технічних обчислень [3]. Перевагою системи MATLAB є її модифікування з метою вирішення різних науково-практичних задач. Ця система має відкриту архітектуру, що дозволяє чітко використовувати мову програмування для створення зручних і наглядних візуально-орієнтованих засобів аналізу, побудови й моделювання систем. Одним із пакетів сучасної версії системи MATLAB є Neural Networks (нейронні мережі), яка містить засоби для побудови нейронних мереж, що базуються на поведінці математичного аналізу нейрона. Важливим при використанні ШНМ є надбудова архітектури мережі і вагових зв'язків для ефективного виконання поставленої задачі, що реалізується у процесі навчання. Для конструювання процесу навчання, по-перше, необхідно мати модель зовнішнього середовища, в якій функціонує нейронна мережа; знати доступну для мережі інформацію. По-друге, необхідно зрозуміти, як модифікувати вагові параметри мережі та які правила навчання управляють процесом надбудови.

Із існуючих трьох парадигм навчання [4], нами використовувався процес навчання «з вчителем», тобто вважали, що НМ володіє правильними відповідями (виходами мережі) на кожний вхідний приклад. Ваги (коефіцієнти) налаштовуються так, щоб мережа давала відповіді, як можна більш близьки до відомих правильних відповідей. Посилений варіант навчання «з вчителем» передбачає, що відома тільки критична оцінка правильності виходу НМ, але не правильні значення виходу.

Кожний алгоритм навчання орієнтований на мережу визначеної архітектури і призначений для обмеженого класу задач [4]. У питаннях,

наприклад, транспортування нафтопродуктів основною метою є забезпечення необхідної експлуатаційної надійності трубопроводів. При цьому основними показниками є в'язко-пластичні характеристики металу труб, які забезпечують надійність транспортної системи.

Як показує аналіз результатів навчання на невеликому об'ємі усіх можливих ситуацій, метод нейромережного моделювання можна застосовувати для визначення і прогнозування в'язко-пластичних властивостей матеріалу труб, які несимбатно (нелінійно) змінюються під дією елементів хімічного складу сталі. Використання ШНМ дозволить, на наш погляд, виявити завуальовані і важко аналізовані зв'язки.

У цій роботі вперше зроблена спроба створення і навчання ШНМ на основі обмеженого вибору експериментальних даних з метою отримання відсутніх відомостей для коректного визначення й інженерного прогнозування в'язко-пластичних властивостей сталей у широкому інтервалі змін хімічних елементів.

## 1.2. Створення і навчання нейронної моделі

Вибір структури НМ (число входів і виходів на кожному нейроні, міжнейронні зв'язки і т.і.), здатній адекватно відтворити функціональні залежності дослідного процесу, реалізовували на основі власного досвіду, інтуїції і відомостей із літератури [4]. Структура НМ (рис. 1) містить 6-ть нейронів: 3-и входні сигнали (значення концентрацій – сірки, водню і церію) і 2-а вихідні – показники в'язко-пластичних властивостей, зокрема межу текучості  $\sigma_T$  і ударну в'язкість KCV (по Шарпу). НМ розглянутого типу в прийнятій термінології називають перцептроном з одним схованим шаром нейронів. Як відмічають автори робіт [3, 4], більшість прикладних задач пов'язана з використанням такого типу мереж, оскільки вони найбільш навчені і навіть одного прихованого шару достатньо для вирішення багатьох задач, зокрема в області досліджень механіки руйнувань.

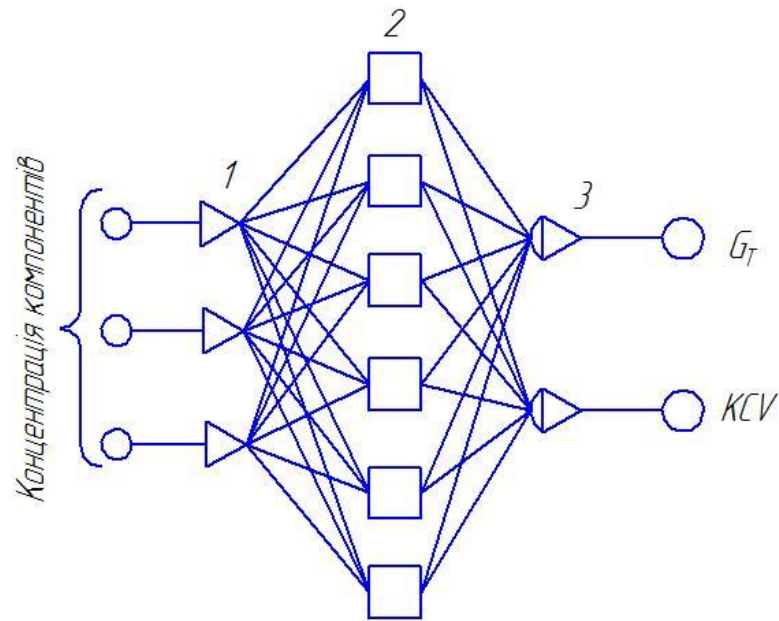


Рис. 1. Структура ШНМ для визначення межі текучості й ударної в'язкості (по Шарпу): 1 – вхідний шар нейронів; 2 – прихований шар нейронів; 3 – вихідний шар нейронів.

Оптимальну кількість нейронів у прихованому шарі НМ вибирали з використанням нейрогенетичного алгоритму, який забезпечує швидкий пошук оптимальної структури НМ [4]. Для кожного із досліджених критеріїв механіки руйнувань трубної сталі аналізували 25 варіантів мережі. В процесі навчання НМ набір експериментальних даних випадковим чином розділявся на дві групи – ті, що навчають (70% даних використовується безпосередньо для навчання) і тестову (30% даних використовується для контролю здатності НМ до узагальнення інформації).

У процесі навчання НМ усі дані підмножини, що навчалися, задіювали в процедурі визначення і зміни їх вагових коефіцієнтів (значимості) в мережі. Крім того, дані тестової підмножини в подібних процедурах не задіювали, оскільки їх основне призначення – постійний контроль здатності НМ до прогнозування даних, не використаних у процесі навчання. Процес навчання продовжували до тих пір, коли досягали мінімальної помилки на тестовій підмножині, при цьому оцінювали не тільки абсолютну величину помилки, але і тенденцію її зміни в процесі навчання нейромережі. Вибір алгоритму



навчання визначали, в основному, швидкістю досягнення та якістю оптимальних параметрів НМ.

Створені нейронні моделі визначали оптимальні значення критеріїв механіки руйнування –  $\sigma_T$  і KCV за будь-яким набором відомих параметрів – концентрації водню, сірки і церію. Створені НМ були реалізовані за допомогою пакета Statistica Neural Network. З використанням НМ, що навчалися, були отримані узагальнюючі залежності в'язко-пластичних характеристик сталі від концентрацій водню, кисню і церія у металі, і на їх основі виконаний прогноз щодо опору матеріалу труб механічним руйнуванням.

За допомогою Visual Basic навчені НМ інтегрували в Excel у вигляді програмних модулів, що дозволило швидко аналізувати великі масиви даних і візуально відображати результати роботи НМ стандартними засобами без розробки інтерфейсу користувача і системи «введення – виведення» даних.

Для реалізації задач прогнозування властивостей сталей був використаний алгоритм зворотнього розповсюдження помилки чи подвійного функціонування, який володіє достатньою гнучкістю і добре справляється з подібними задачами. Нейромережі, використовуючі алгоритм подвійного функціонування, як правило, багатошарові (між першим і останнім шарами нейронів знаходяться приховані) і при навчанні інформація послідовно пропускається через шари. Отримані на виході помилки прогоняються через нейромережу в зворотному напрямку і вихідні сигнали корегуються.

Перевага ідеї зворотного розповсюдження полягає у тому, що вона дозволяє оцінити помилки для нейронів прихованих шарів. Відомі помилки, здійснені нейронами вихідного шару, виникають внаслідок невідомих поки що помилок нейронів прихованих шарів. Чим більше значення синаптичного зв'язку між нейроном прихованого шару, тим сильніше помилка першого впливає на помилку другого. Отже, оцінку помилки елементів прихованих шарів можна отримати, як зважену суму помилок наступних шарів. При навчанні інформація розповсюджується від нижчих шарів до вищих, а оцінки

помилки здійснені мережею – у зворотному напрямку, що відображено у назві методу.

Описана процедура є ітераційною і закінчується при досягненні необхідної точності рішення задачі чи при закінченні часу, виділеного на навчання нейромережі.

Використання нейромережного аналізу дозволило отримати нейронну модель, здатну прогнозувати в'язко-пластичні властивості сталей залежно від їх хімічного складу і концентрації модифікуючих домішок.

У досліджах використовували результати досліджень впливу церію, сірки і водню на в'язко-пластичні характеристики конструкційної сталі марки 3, які детально викладені в надрукованій літературі, зокрема в роботах [5 – 7].

## **2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Перш за все слід відмітити, що дані, наведені в роботах [5 – 7], одержані в обмеженому діапазоні умов, матеріалів і термінів випробувань, що не дозволяє провести масштабний аналіз залежностей критеріїв в'язко-пластичних властивостей від концентрації шкідливих домішок – водню і сірки, а також корисної, з металургійної точки зору, добавки – церія. Очевидним є тільки наявність визначених симпатних (нелінійних) зв'язків між змінними величинами.

Таким чином, отримані в роботах [5 – 7] експериментальні результати свідчать про складну залежність параметрів в'язко-пластичного руйнування від умісту в дослідних сталях модифікуючої домішки церія і шкідливих вкраплень – водню і сірки. Тому, застосуємо для аналізу експериментальних даних нейромережеве моделювання.

Відомо [3, 4], що структура і методи навчання ШНМ залежать від якісного масиву експериментальних даних, які подаються на вхід ШНМ і складності в'язко-пластичних процесів руйнування, що визначаються. Результати комп'ютерних експериментів із вибору структури ШНМ і її наступного

навчання дозволили вибрати число нейронів у прихованому шарі, причому помилка навчання і тестування вибраної структури НМ, не дивлячись на різний алгоритм навчання, несуттєво відрізняється при аналізі критеріїв в'язко-пластичного руйнування (у якості прикладу в табл. 1 приведені результати навчання і тестування ШНМ по критеріям  $\sigma_T$  і KCV).

Таблиця 1 – Оптимальні параметри ШНМ для прогнозування в'язко-пластичних параметрів  $\sigma_T$  і KCV і помилка ШНМ при навчанні і тестуванні

В'язко-пластичні параметри на виході мережі	Кількість нейронів в схованому шарі мережі	Помилка навчання мережі	Помилка тестування мережі	Алгоритм навчання	Число циклів навчання
$\sigma_T$	6	0.023	0,0783	ЛМ	285
	6	0.012	0,0430	ССГ	215
KCV	6	0.045	0,0892	ЛМ	345
	6	0.031	0,0631	ССГ	270

Примітка: ЛМ – метод Левенберга-Маркара; ССГ – метод спуска по спорідненим градієнтам.

Середньоквадратичні помилки навчання і тестування складають відповідно 0,9 – 3,2 і 3,1 – 6,7%, що свідчить про добру навченість ШНМ і їх здатність з достатньо малою помилкою передбачати значення показників в'язко-пластичних властивостей матеріалів.

При оцінці впливу кожного із вхідних параметрів (концентрація модифікуючої добавки церія і домішок сірки та водню) на якість критеріїв значимості фактора служила ступінь погіршення роботи ШНМ у випадку його відсутності [4].

Навчені ШНМ використовували для прогнозування показників в'язко-пластичних характеристик як в середині області експериментально апробованих параметрів, так і за її межами. Як видно із рис. 2 – 4, показники в'язкості і пластичності складним чином залежать від концентрації сірки, водню і церія в сталях конструкційного призначення, але все ж можна прослідкувати деякі загальні закономірності.

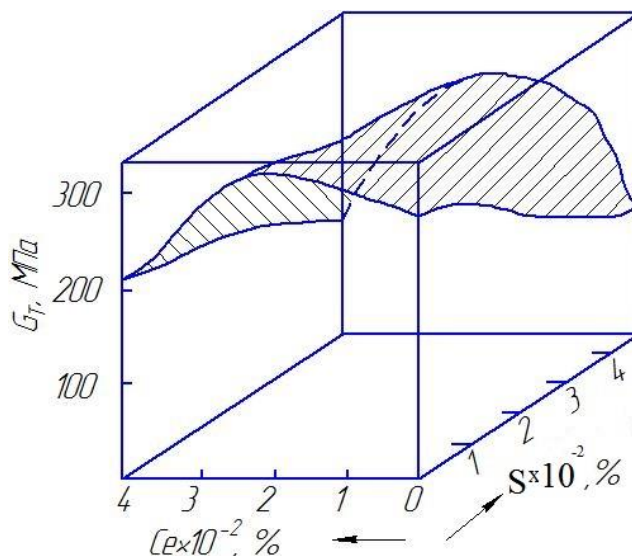


Рис. 2. Нейромережевий аналіз спільного впливу церію і сірки на межу текучості трубної сталі марки 3. Температура випробувань – (+20<sup>0</sup>С)

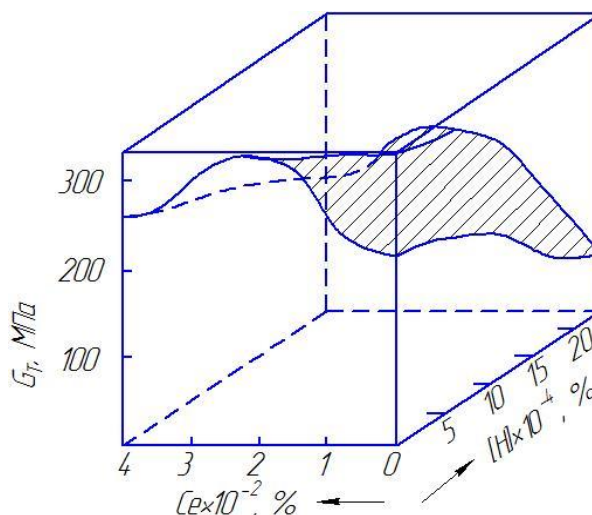


Рис. 3. Нейромережний аналіз спільного впливу церію і водню на межу текучості трубної сталі марки 3. Температура випробувань – (+20<sup>0</sup>С)

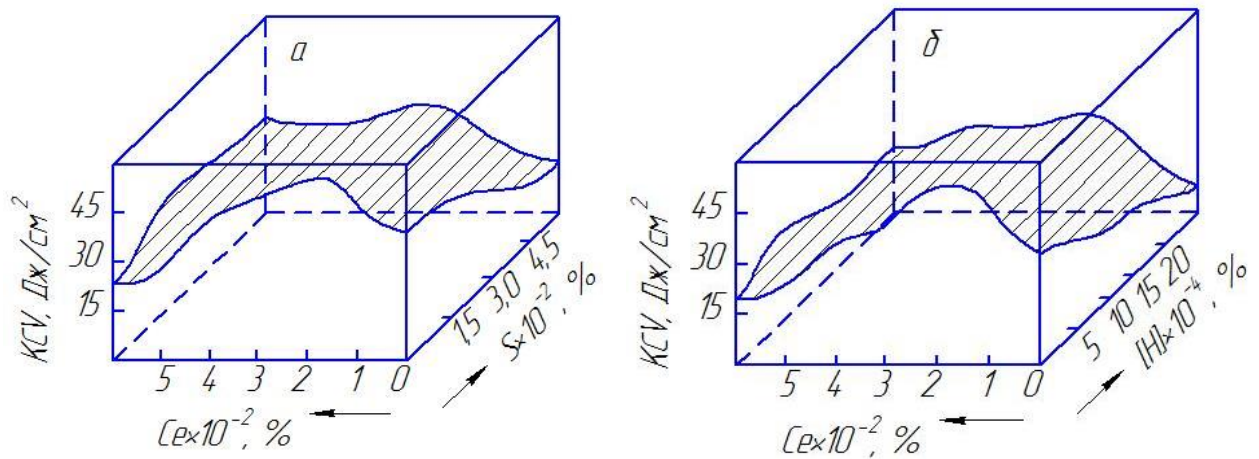


Рис. 4. Нейромережний аналіз спільного впливу церію (*a*, *б*), сірки (*a*) і водню (*б*) на ударну в'язкість по Шарпу при температурі випробувань  $-40^{\circ}\text{C}$ .

### Сталь дослідна на основі марки 3

Аналіз одержаних даних, наведених на рис. 2–4, показує, що при спільному збільшенні церію (0,025 – 0,04 %) і сірки (0,025 – 0,045 %) різко знижуються параметри текучості і в'язкості метала. Така ж тенденція спостерігається і у випадку спільного і одночасного збільшення в металі сірки (більше 0,025 – 0,030 %) і зменшення церія (менше 0,010 – 0,015 %). Причому негативний вплив занадто великого вмісту сірки (більше 0,025 %) не здатний компенсувати навіть велика кількість вмісту церія (більше 0,025 %) в металі. Така ж тенденція спостерігається і при одночасній дії в металі водню і церія, причому деградуючу дію водню при його критичному вмісті в металі  $(5 - 20) \cdot 10^{-4}\%$  здатний загальмувати церій при модифікуванні металу в кількості 0,015 – 0,025 %. Виходячи з одержаних за допомогою НМ результатів, можна заключити, що для забезпечення високої стійкості вуглецевої сталі, яка широко використовується на машинобудівельних підприємствах нафтогазової і нафтопереробної галузі, проти в'язко-пластичного руйнування трубопровідних конструкцій необхідно в процесі виплавки сталі металургійними методами недопустити високого вмісту водню і сірки, обмеживши їх концентрацію відповідно  $(10 - 15) \cdot 10^{-4}\%$  і 0,015 – 0,025 %. До речі, отримані результати добре узгоджуються з даними, відомими із літератури [1, 2, 5 – 7].

Навчені ШНМ дозволили проаналізувати як співвідносяться між собою концентрації церія і сірки, а також церія і водню з позиції комплексного впливу на в'язко-пластичні характеристики металу, в тому числі за межею області експериментів.

Аналіз отриманих результатів за допомогою нейромереж дозволив сформулювати узагальнену діаграму (рис. 5) передбачених областей високих в'язко-пластичних характеристик вуглецевих сталей, економно модифікованих мікродобавкою церія, які можуть використовуватися для виготовлення труб транспортних систем промислових підприємств.

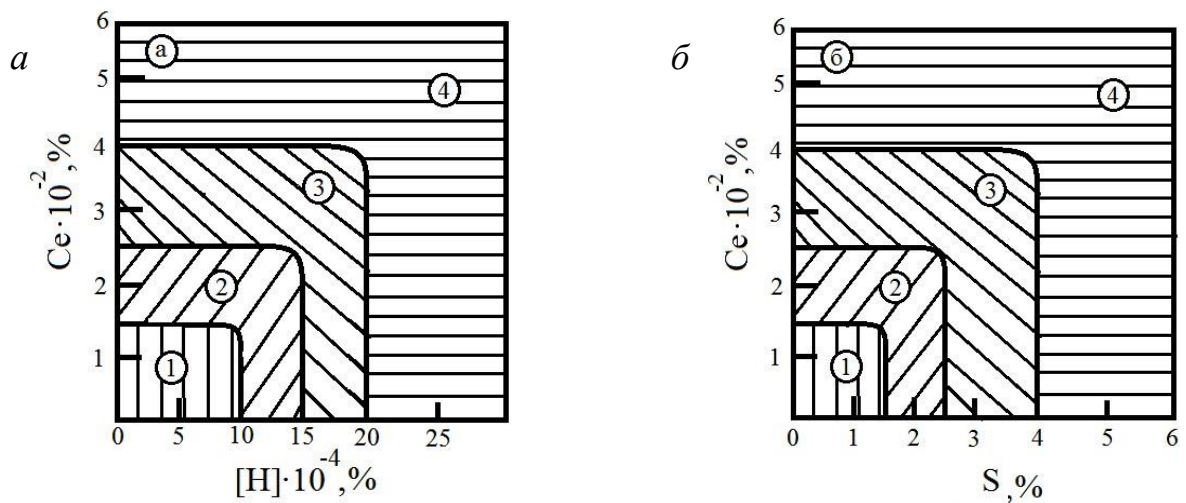


Рис. 5. Прогнозовані нейромережею параметри в'язко-пластичного спротиву руйнуванню трубних вуглецевих сталей, економно модифікованих церієм, із змінним вмістом сірки (а) і водню (б): 1 – область слабкої стійкості в'язко-пластичним деформаціям; 2 – область високої стійкості в'язко-пластичним деформаціям; 3 – область середньої стійкості в'язко-пластичним деформаціям; 4 – область низької стійкості в'язко-пластичним деформаціям.

Таким чином, ШНМ дозволила однозначно визначити області високих в'язко-пластичних властивостей трубної вуглецевої сталі і показати, в яких випадках вона схильна до зниження опору проти утворення мікротріщин з причини знеміцнення металу і як на цей процес спільно впливають церій, водень і сірка.

При експлуатації вуглецевої конструкційної сталі марки 3 на підприємствах нафтогазової і машинобудівної галузей її схильність до окрихчення і руйнування буде значною при підвищеному вмісту сірки і водню в металі і відсутності модифікуючої домішки церія, навіть не дивлячись на відносно невисокий вміст шкідливих домішок сірки (0,030 – 0,045%) і водню  $(5-15) \cdot 10^{-4}\%$ . На основі одержаних залежностей можна, не проводячи додаткових складних і трудомістких досліджень, з використанням нейромережевого моделювання якісно передбачувати механічну тріщиностійкість трубної сталі в конкретних умовах експлуатації.

Слід відмітити, що навчена ШНМ дозволяє розширити діапазон прогнозованих значень факторів за межі експериментальних даних, зокрема передбачити значення показників в'язкості і пластичності сталей, які відповідальні за тріщиностійкість сталей, що містять такі елементи, як сірку, водень і церій в кількостях, перевищуючих розглянуті концентрації в даному дослідженні. Природньо помилка прогнозу, який надається ШНМ, буде збільшуватися по мірі віддалення від границь, визначаючих експериментальні дані.

## ВИСНОВКИ

1. Багатьма авторами встановлений негативний вплив водню, сірки і кисню на в'язко-пластичні характеристики метала, які відповідають за тріщиностійкість трубних конструкцій на нафтогазових підприємствах. Однак, відсутні конкретні рекомендації стосовно методів забезпечення оптимальних механічних характеристик трубних сталей, що не дозволяє гарантувати безпечний ресурс технологічного обладнання промисловості.

2. Літературний огляд вказує на різноманітність і великий об'єм експериментального матеріалу без достатньої аналітичної обробки в силу невизначеності і суперечливості інформації щодо механічних властивостей трубних сталей, отриманих із застосуванням традиційних методик, що призводить до необхідності пошуку альтернативних методів її ефективного аналізу.

3. Експериментально встановлена і за допомогою нейромережей науково обґрунтована оптимальна концентрація мікрomodифікуючої добавки церія у вуглецевій сталі, яка обмежена діапазоном 0,015 – 0,025 %, що дозволяє забезпечити низький уміст шкідливих елементів в металі – сірки ( $\leq 0,025$  %) і водню [ $\leq (12 - 15) \cdot 10^{-4}$ %] і, як наслідок, високі в'язко-пластичні властивості – межу текучості  $\sigma_{0.2}$  і ударну в'язкість KCV (по Шарпу), які характеризують тріщиностійкість вуглецевих сталей.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко Р.О. Моделювання методами нейронних мереж: навч.-метод. посібн. / Р.О. Ткаченко, П.Р. Ткаченко, Н.О. Мельник. – Львів: Вид-во ЛІБС УБС НБУ, 2010. – 114 с.
2. Металознавство та термічна обробка чорних та кольорових металів: підруч. для студ. вузів / Борис Петрович Середя; В.о. Запоріз. держ. інженерна акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2008. – 302 с.
3. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: пер. с англ. / С. Хайкин. – Изд. 4-ое, [пере-раб. и доп.]. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. – 248 с.
4. Горбань А.Н. Обучение нейронных сетей / А.Н. Горбань. – М.: СП ПараГраф, 1991. – 156 с.
5. Коррозионная стойкость сварных металлоконструкций нефтегазовых объектов / В.Д. Макаренко, И.М. Ковенский, Н.Н. Прохоров и др. под. ред. В.Д. Макаренко. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр». – 2000. – 500 с.
6. Сварка и коррозия нефтегазопроводов Западной Сибири / В.Д. Макаренко, С.И. Грачев, Н.Н. Прохоров и др. – К.: Наукова думка. – 1996. – 549 с.
7. Макаренко В.Д. Надежность нефтегазопромысловых систем / В.Д. Макаренко. – Челябинск: ЦНТИ. – 2004. – 826 с.