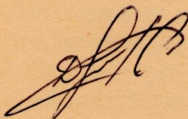


620.179.1(043)  
Д 71  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Доценко Євген Романович



УДК 620.179.1(043)

971

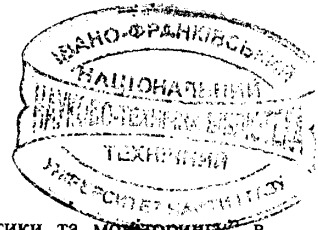
**КОНТРОЛЬ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ  
СТАЛЕЙ ЗА ЇХ ПИТОМИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ОПОРОМ**

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2010

Дисертацією є рукопис



Робота виконана на кафедрі „Технічної діагностики та моніторингу” в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Карпаш Максим Олегович**  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, директор Науково-дослідного інституту нафтогазової енергетики і екології

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Яцун Михайло Андрійович**  
Національний університет “Львівська політехніка”, професор кафедри електричних машин і апаратів  
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Бондаренко Юрій Купріянович**  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, завідувач відділом

Захист :  
ради ,  
універси  
76019, м

ованої вченої  
технічному

З дис  
націона  
вул. Кар

Франківського  
но-Франківськ,

Автореф

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, професор

Дранчук М.М.



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність теми.

Проблема забезпечення надійної та безпечної експлуатації сталевих конструкцій з кожним роком стає все більш актуальною, оскільки їх зношення значно перевищує темпи технічного переоснащення. Близько 60-80% металоконструкцій відпрацювали проектні терміни експлуатації. Такий стан речей характерний для галузей промисловості, у яких металоконструкції зазнають знакозмінних навантажень, теплових впливів та дії агресивного середовища (нафтогазова промисловість, теплова та ядерна енергетики, хімічна промисловість, промислове будівництво).

Сумісний вплив згаданих чинників у реальних умовах експлуатування призводить до зміни фізико-механічних характеристик (ФМХ) металу сталевих конструкцій. Окрім того, широкий діапазон сталевих матеріалів, що використовуються для виготовлення відповідальних деталей, різноманітність технологічних маршрутів, що формують фізико-механічні характеристики, потребує проведення контролю поставленої на підприємство продукції, в тому числі й поопераційного контролю ФМХ, що формуються у ході оброблення. Крім того, в експлуатації перебуває значна кількість устаткування, на яке втрачена експлуатаційна документація, що працює за змінних умов експлуатації. Значну роль у визначенні всього комплексу ФМХ і якості виготовлених виробів відіграють неруйнівні фізичні методи контролю, розвитку яких на даний час приділяється велика увага дослідників. Проте, існуючі неруйнівні методи визначення механічних характеристик базуються, в основному, на визначенні таких параметрів як твердість і коерцитивна сила. Вони є недостатньо інформативними і характеризуються рядом недоліків і припущень, що стосуються теорії та практичної реалізації.

У зв'язку з цим, проблема дослідження нових методів визначення механічних характеристик сталей промислових конструкцій є надзвичайно актуальною, вирішення якої дозволить більш достовірно визначати залишковий ресурс відповідальних об'єктів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася у рамках науково-дослідних робіт „Дослідження нових методів визначення фактичних фізико-механічних властивостей металоконструкцій тривалої експлуатації неруйнівними методами”. (№ держреєстрації 0107U001559, угода ІФНТУНГ із МОН України), „Розроблення нових неруйнівних методів та технологій визначення міцнісних характеристик металоконструкцій довготривалої експлуатації” (№ держреєстрації 0107U010020, угода ІФНТУНГ із МПЕ України), “Дослідження мікроструктурних змін в матеріалах, які використовуються в нафтогазовій галузі, неруйнівними методами” (№ держреєстрації 0108U005809, угода ІФНТУНГ із МОН України). Ці роботи виконувалися за безпосередньої участю автора.

**Мета роботи** полягає у вирішенні важливої науково-практичної задачі в галузі приладів і методів неруйнівного контролю матеріалів - розробленні методу

визначення механічних характеристик конструкційних сталей за питомим електричним опором та розробленні дослідного взірця установки для його реалізації.

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

- проаналізувати сучасний стан розвитку методів та засобів неруйнівного контролю механічних характеристик конструкційних сталей з метою вибору оптимальних методів контролю;
- дослідити та виділити інформативні параметри визначення механічних характеристик конструкційних сталей і розробити метод їх визначення;
- здійснити математичне моделювання процесу вимірювання обраних інформативних параметрів з метою розрахунку оптимальних конструктивних параметрів вимірювальної системи та впливу геометричних параметрів об'єкту контролю (ОК) на результати контролю;
- експериментально встановити наявність та характер взаємозв'язків між досліджуваними інформативними параметрами та механічними характеристиками конструкційних сталей, а також підвищити точність визначення механічних характеристик за рахунок використання штучних нейронних мереж.
- розробити, виготовити та здійснити перевірку дослідного взірця установки для контролю механічних характеристик конструкційних сталей та методики його застосування в практиці.

**Об'єктом дослідження** є процес визначення механічних характеристик конструкційних сталей в експлуатаційних умовах.

**Предметом дослідження** є методи та засоби неруйнівного визначення механічних характеристик (на прикладі границі плинності) конструкційних сталей.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених в роботі задач використовувались методи неруйнівного контролю, математичного моделювання, кореляційного аналізу та сучасні методи статистичного оброблення експериментальних та довідкових даних (штучні нейронні мережі). У ході виконання експериментальних досліджень використовувались методи планування експерименту, теорії імовірності. Розроблення технічного засобу здійснювалось з використанням методів схемо- та системотехніки. Для розроблення програмного забезпечення для оброблення вимірювальної інформації використовувались методи алгоритмізації та програмування.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

- вперше встановлено наявність та характер взаємозв'язків між питомим електричним опором та механічними характеристиками конструкційних сталей, що дало змогу розробити метод контролю механічних характеристик сталей;
- вперше здійснено теоретичні дослідження процесу вимірювання питомого електричного опору, що дало змогу розрахувати конструктивні параметри вимірювальної системи та вплив геометричних параметрів об'єкту контролю на результати вимірювання;

- вперше запропоновано спосіб визначення границі плинності сталей, що полягає у комплексному врахуванні параметрів питомого електричного опору та твердості в межах структурних груп, що дало змогу підвищити точність її визначення;

- знайшла подальший розвиток методологія розрахунку питомого електричного опору сталей, що дало змогу встановити характер залежності між фактичними значеннями границі плинності та питомим електричним опором конструкційних сталей.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в розробленні технічного засобу для визначення основних механічних характеристик конструкційних сталей (пройшов успішну промислово апробацію на виробничих об'єктах ТзОВ "Івано-Франківський "Вторчормет" та ТзОВ "Західхмілс"), а також проекту методики (СОУ) його застосування для розрахунків механічних характеристик сталевих конструкцій у базових галузях промисловості. Розроблений метод, завдяки використанню нового комплексу інформативних параметрів та використанню алгоритмів штучних нейронних мереж для вирішення задачі багатопараметричної апроксимації дає змогу точніше визначати фактичні механічні характеристики конструкційних сталей. Завдяки вимірюванню структурно чутливої характеристики – питомого електричного опору, метод в подальшому може бути поширений на вирішення задач структуроскопії, оцінки якості термічного оброблення та визначення інших механічних характеристик (ударної в'язкості тощо) сталей.

#### **Особистий внесок здобувача.**

Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Зокрема, в опублікованих у співавторстві роботах, автором особисто:

- розроблено метод визначення механічних характеристик конструкційних сталей за значеннями питомого електричного опору [2-4,8,11-14], а також запропоновано шляхи реалізації розробленого методу контролю у вигляді експериментальної установки [5,7,15-17,19];

- встановлено наявність та характер залежності границі плинності від питомого електричного опору [2,7];

- удосконалено математичну модель контролю питомого електричного опору сталевих об'єктів правильної геометричної форми електроконтактним чотиризондовим методом та розраховано конструкцію вимірювального перетворювача для підвищення чутливості методу [6,7,20], а також розроблено методику та проведено комплекс експериментальних досліджень з метою перевірки адекватності математичної моделі та методу загалом [5,7,14,15,17-19];

- розроблено конструкцію чотиризондового вимірювального перетворювача [7], а також сформовано послідовність роботи експериментальної установки в цілому [5,7,17].

**Апробація роботи.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 9-ій міжнародній конференції виставці «Проблеми корозії та

протикорозійного захисту матеріалів «Корозія-2008» (м. Львів, 2008р.), на 4-ій науково-практичній конференції „Організація неруйнівного контролю якості продукції в промисловості” (Єгипет, 2008 р.), на міжнародній науково-практичній конференції “Міцність та надійність магістральних трубопроводів” (м. Київ, 2008р.), на Всеукраїнській конференції молодих вчених “Сучасне матеріалознавство: матеріали та технології” (м. Київ, 2008р.), на 5-ій міжнародній науково-технічній конференції і виставці “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання” (м. Івано-Франківськ, 2008р.), на 6-ій національній науково-технічній конференції і виставці “Неруйнівний контроль та технічна діагностика” (м. Київ, 2009р.), на міжнародній науково-технічній конференції “Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи” (м. Івано-Франківськ, 2009р.), на 2-ій науково-практичній конференції студентів і молодих учених “Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання” (м. Івано-Франківськ, 2009р.), на 4-му і 5-му міжнародних симпозіумах по вуглеводням та хімії (Алжир, 2008р., 2010р.), на міжнародній конференції спеціалістів промислового комплексу Карпатського Сврорегіону (м. Бая-Маре, Румунія, 2008р.), на міжнародних конференціях «Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів «Леотест-2008» та «Леотест-2010» (м. Славське, Львівської області), на міжнародній науково-технічній конференції молодих учених «Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії» (м. Івано-Франківськ, 2008р.) та на семінарах кафедри «Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції» Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) у 2008-2010 р.р.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 20 друкованих праць, з них 7 – статей у фахових наукових виданнях, затверджених ВАК України, в тому числі 1 – одноособова, 1 - патент України на винахід, 12 - тези доповідей на конференціях.

**Структура та об’єм роботи.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 140 сторінках. Крім того робота проілюстрована 44 рисунками, включає 15 таблиць, список використаних джерел із 109 найменувань та 10 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику дисертаційної роботи. Розкрито суть та стан науково-технічної проблеми контролю механічних характеристик конструкційних сталей, що використовуються в базових галузях промисловості. Обґрунтовано актуальність теми, що дало можливість сформулювати мету та основні задачі дослідження. Розкрито наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, подано відомості про особистий внесок здобувача та апрабацію роботи.

У першому розділі проведено аналіз основних чинників та умов експлуатації металоконструкцій тривалої експлуатації, що призводять до зміни фізико-механічних характеристик конструкційних сталей, що використовуються у базових галузях вітчизняної промисловості.

Проведено аналіз методів і технічних засобів неруйнівного визначення основних механічних характеристик конструкційних сталей. Дослідження неруйнівними методами щодо визначення механічних характеристик сталей проводили чимало зарубіжних та вітчизняних вчених – Міхєєв М.Н., Горкунов Э.С., Біда Г.В., Костін В.Н., Мельгуй М.А., Дорофєєв А.Л., Яцун М.А., Бондаренко Ю.К., Молодецький І.А., Шарко А.В., Безлюдько Г.Я., Карпаш М.О., Учанін В.М., Kronging M., Z. Guo, W. Sha, M. Balazinski, M.Saka, J. W. Byeon, S.H. Nahm, A. Kim та інші. Проте, основна увага переважної більшості вчених була зосереджена на розробленні чи вдосконаленні одного з методів неруйнівного контролю (акустичний, магнітний тощо) із залученням, переважно, одного інформативного параметра контролю. Крім того, вони здебільшого поширюються на певну групу чи марку сталей, що значно звужує сферу їх використання.

Аналіз сучасних підходів до неруйнівного визначення механічних характеристик сталей показав, що всі відомі методи можна поділити за типом фізичних полів, що взаємодіють з об'єктом контролю, на магнітні, електромагнітні, теплові та електричні. Показано, що існує наукова проблема у встановленні аналітичних залежностей між механічними характеристиками та досліджуваними інформативними параметрами. Більшість технічних засобів призначені для контролю твердості та коерцитивної сили, що значно обмежує їх застосування на сталевих об'єктах різного призначення, з різними умовами експлуатації і виготовлених з різних груп сталей.

Показано необхідність удосконалення існуючих методів і розроблення нових підходів і технічних засобів визначення механічних характеристик конструкційних сталей. Запропоновано визначати механічні характеристики сталей за їх питомим електричним опором як структурно чутливою характеристикою, що регламентується в нормативній технічній документації на конструкційні матеріали. Показано, що для вимірювання питомого опору феромагнітних сталей доцільно використати електроконтактний чотиризондовий метод. Сформульовано завдання, що потребують вирішення та обрано напрямки подальших досліджень.

Другий розділ присвячений теоретичним дослідженням щодо нових підходів і методів визначення механічних характеристик конструкційних сталей за їх питомим електричним опором.

На першому етапі досліджень було досліджено взаємозв'язок механічних характеристик (на прикладі границі плинності) із питомим електричним опором. Зокрема, було показано, що границю плинності сталей за значеннями їх питомого електричного опору доцільно визначати в межах окремих типів структур.

Для перевірки вище зазначеної теоретичної ідеї, було використано відомості щодо ФМХ для 142 іноземних марок сталей, які були вибрані з різними типами структур (аустенітна, дуплексна, феритна, мартенситна) і з великим діапазоном значень їх фізико-механічних характеристик.

З метою встановлення взаємозв'язку між границею плинності та питомим електричним опором було проведено кореляційний аналіз і графоаналітичні дослідження ФМХ сталей, які показали, що кращий взаємозв'язок між ними спостерігається в межах окремих структурних груп, ніж для загальної вибірки зі всіма сталями. Теоретичні дослідження показали також, що, використовуючи відхилення від закону Відемана-Франца (відношення значень питомих теплопровідності та електропровідності не є постійним для вуглецевих сталей, на відміну від чистих металів), певну сталь можна віднести до тієї чи іншої структурної групи (аустенітно-дуплевної або феритно-мартенситної).

Враховуючи нелінійний характер залежностей між вхідними параметрами та механічними характеристиками, для апроксимації границі плинності як нелінійної багатопараметрової функції комплексу параметрів питомого електричного опору та коефіцієнта теплопровідності, було використано штучні нейронні мережі в межах кожної структурної групи. Нейронні мережі передбачають процедуру тренування та тестування правильності тренування, для чого з усіх марок сталей було сформовано три окремих набори тренувальних та тестових даних (*1-й набір* – сталі аустенітно-дуплевної структурної групи; *2-й набір* – сталі феритно-мартенситної структурної групи; *3-й набір* – сталі всіх типів структур). Результати тестування натренованих мереж для 3-х наборів даних наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати тестування нейронних мереж

Сталь		1	2	3	4	5	6	7	8	Похибка тестування МПа %	
Набір даних	Дійсні значення границі плинності	275	310	485	280	450	275	350	560		
1-й	Реальні виходи нейронної мережі	271	313	492	283	430	-	-	-	7,4	3,52
2-й	Реальні виходи нейронної мережі	-	-	-	-	-	273	384	562	12,6	4,42
3-й	Реальні виходи нейронної мережі	276	316	483	273	379	328	345	478	28,3	9,92

Таким чином, визначення механічних характеристик сталей в межах груп із однаковою або схожою структурами дозволяє в 2-3 рази підвищити точність



визначення механічних характеристик, що узгоджується із відомим зв'язком між структурним станом сталей та їх механічними характеристиками.

Щодо вимірювання обраних інформативних параметрів, то твердість можливо вимірювати з допомогою серійних динамічних твердомірів типу ТД-32.

Щодо вимірювання питомого електричного опору, то попередні теоретичні дослідження показали доцільність та можливість використання електроконтактного чотиризондового методу. Тому подальшим етапом досліджень стало проведення математичного моделювання процесу контролю питомого опору конструкційних сталей чотиризондовим методом, яке б підтвердило таку можливість.

Математичне моделювання проводилося з метою вирішення двох основних завдань:

- 1) розрахунок співвідношення відстаней між струмовими та потенціальними (вимірювальними) електродами-зондами для підвищення чутливості методу;
- 2) встановлення аналітичної залежності між шуканим значенням питомого електричного опору матеріалу та вимірними значеннями струму та напруги, а також визначення достатньої точності засобів вимірювання питомого електричного опору.

Для вимірювання малих значень питомого електричного опору сталей, доцільно збільшити чутливість методу по напрузі. Чутливість чотиризондового методу обернено пропорційна еквівалентній відстані між зондами  $S_{екв}$ . Проведені теоретичні дослідження показали, що для вимірювання питомого опору конструкційних сталей лінійні розміри системи зондів повинні бути такими: відстань між струмовими та відповідними їм потенціальними контактами –  $S=10\text{мм}$  (рис. 1.а); відстань між потенціальними контактами –  $S_2=60\text{мм}$  (рис. 1.б).

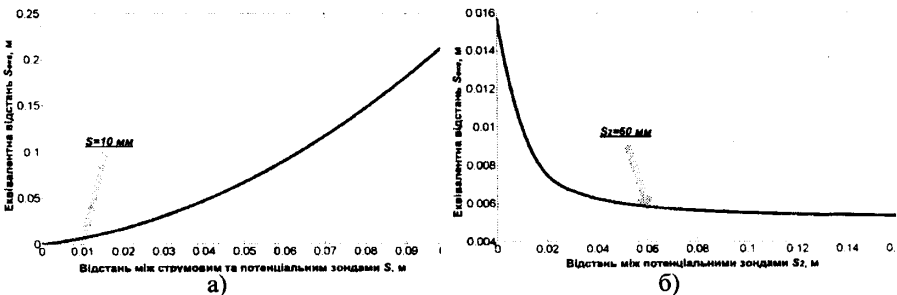


Рис. 1. Залежність еквівалентної відстані від відстані між відповідними струмовими та потенціальними зондами (при  $S_2=30\text{мм}$ ) – а) та від відстані між потенціальними зондами (при  $S=10\text{мм}$ ) – б)

Було побудовано математичну модель процесу вимірювання питомого електричного опору прямокутного плоского зразка для випадку розміщення чотиризондового вимірювального перетворювача у центрі зразка, за якою зонди розміщені вздовж повздовжньої осьової лінії зразка:

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

де  $U$  – падіння напруги на ділянці зразка між потенціальними зондами;  $I$  – сила постійного струму;  $f(m, a, b, h/S)$  – геометрична функція поправки, що залежить від реальних кінцевих розмірів (довжини  $a$ , ширини  $b$  та товщини  $h$ ) прямокутного зразка та від співвідношення лінійних розмірів системи зондів,  $S$  – відстань між струмовими та відповідними їм потенціальними зондами;  $m$  – відношення лінійних розмірів системи зондів  $m = S_z / S$ .

Було отримано аналітичний вираз для розрахунку геометричної функції поправки шляхом застосування методу дзеркальних відображень для тривимірної системи диполів:

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

де  $k, n, g$  – кількість рівнів уявних джерел струму, які вводяться 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 нулю).

На рис.2 зображено графік залежності геометричної функції поправки від товщини плоского об'єкта напівнескінчених поперечних розмірів. Такий характер кривої зберігається також для залежностей функції поправки від довжини та ширини прямокутного зразка.

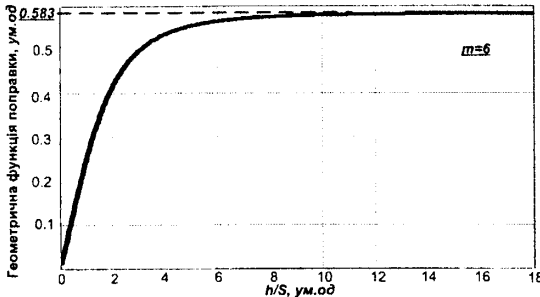


Рис.2. Залежність геометричної функції поправки від товщини

У всіх випадках, коли розміри зразка набагато більші за лінійні розміри системи зондів, зразок можна вважати напівнескінченим, тоді питомий електричний опір розраховується за формулою (1), при цьому геометрична функція поправки наближається до значення  $K = \frac{m+1}{2m}$  (коефіцієнт поправки, який залежить тільки від співвідношення відстаней між зондами). Для випадку, коли

$m=1$ ,  $K=1$ , для  $m=6$ ,  $K=0.583$  (рис.2). Для зразків кінцевих розмірів геометрична функція поправки має нижчі значення за коефіцієнт  $K$ .

З урахуванням результатів математичного моделювання, на етапі конструювання експериментальної установки, необхідно виготовити чотиризондовий вимірювальний перетворювач. Встановлено, що як вторинний вимірювальний блок визначення питомого опору необхідно використати вимірювач опору типу мікроомметр.

В третьому розділі викладено роботи щодо розроблення експериментальної установки, а також методика та результати експериментальних досліджень щодо: перевірки адекватності математичної моделі процесу контролю питомого електричного опору для встановлення залежності геометричної функції поправки від розмірів сталених зразків; випробувань запропонованого методу визначення механічних характеристик на сталених зразках; метрологічної оцінки запропонованого методу визначення механічних характеристик конструкційних сталей.

Було розроблено та налагоджено експериментальну установку (рис.3), яка реалізує електроконтактний чотиризондовий метод, для вимірювання питомого електричного опору конструкційних сталей.

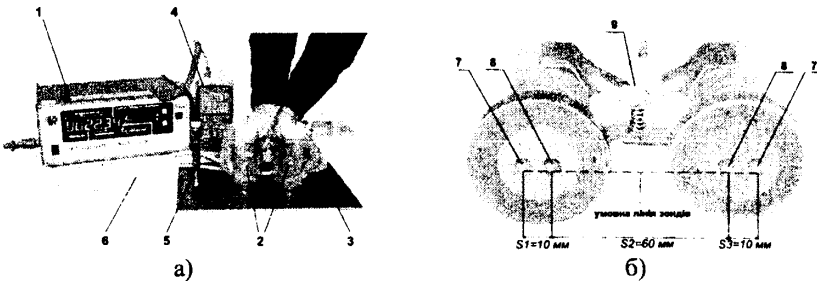


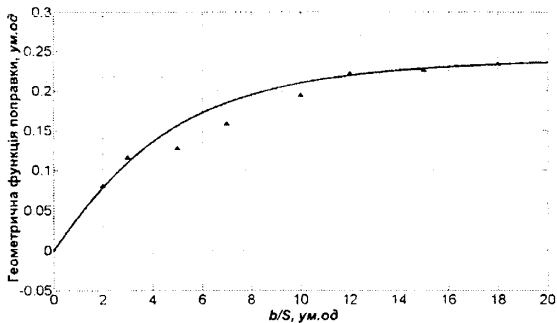
Рис. 3. Загальний вигляд експериментальної установки а) та контактного механізму б):

1 – мікроомметр, 2 – контактний механізм, 3 – об’єкт контролю, 4 – цифровий термометр, 5 – контактна термопара, 6 – точкова термопара; 7- струмові зонди; 8 – потенціальні (вимірювальні) зонди; 9 – зажимний фіксатор

До складу установки входить: вимірювальний блок 1 на базі атестованого мікроомметра БСЗ-010-2 (зав.№ 135) (фірма “Самаразнерго”, Росія); контактний механізм 2 для забезпечення електричного контакту вимірювального блоку з об’єктом контролю 3; цифровий термометр 4 Fluke 54-II, що дозволяє оперативно отримувати результати вимірювання з лабораторною точністю  $\pm (0.05\%+0.3^\circ\text{C})$ ; контактна термопара 5 (серія NR-31B, тип К) для вимірювання температури на поверхні об’єкта контролю 3; точкова термопара 6 (серія NR-39, тип К) для вимірювання температури навколишнього середовища.

Контактний механізм представляє собою два окремих контактори 2, в корпусі кожного з яких міститься пара зондів-електродів – відповідно струмовий 7 та потенціальний 8. Зонди-електроди круглого перерізу зі загостреними кінцями виготовлені зі сталі 45 і загартовані. Відстань між парою зондів в кожному контакторі становить  $(10 \pm 0,1)$  мм. Контактори з'єднані зажимним фіксатором 9 таким чином, що кінці всіх зондів розміщені вздовж прямої лінії і відстань між потенціальними контактами становить  $(60 \pm 0,1)$  мм, що узгоджується з результатами математичного моделювання. Підпружинення зондів дозволяє самовстановлюватись корпусу контакторів відносно досліджуваної поверхні з урахуванням її незначних нерівностей. Оператор руками навантажує контактний механізм до моменту, коли засвітяться верхні сегменти цифрового табло мікрометра, що сигналізує про встановлення електричного контакту приладу з об'єктом контролю.

Для встановлення залежності геометричної функції поправки від ширини зразків було відібрано вісім зразків з марки сталі 45 з різною шириною (20, 30, 50, 70, 100, 120, 150 та 180 мм), довжиною 280 мм та товщиною 10 мм. За однакових умов при температурі  $(20 \pm 0,3)^\circ\text{C}$  на кожному зразку виконано 10-кратні вимірювання активного електричного опору і розраховано відповідні геометричні функції поправки, використовуючи вираз (2). Для перевірки адекватності одержаного аналітичного виразу для функції поправки (2), було виконано співставлення результатів розрахунку геометричної функції поправки, одержаних експериментально та теоретично (рис.4).



▲ - експериментальні дані; — - теоретичні дані відповідно до формули (2)

Рис.4. Залежність геометричної функції поправки від ширини зразків

Метою подальших досліджень стало встановлення залежності між границею плинності та питомим електричним опором для експериментальної перевірки розробленого методу контролю механічних характеристик конструкційних сталей.

Методика проведення експериментальних досліджень була наступною. Було відібрано 14 плоских повнорозмірних зразків конструкційних сталей прямокутної форми. Для зменшення впливу різних чинників (анізотропії матеріалу зразків,

шорсткості поверхні тощо) на результати вимірювань кожен зразок був поділений на 10 зон. У кожній зоні були викопані однократні вимірювання твердоміром ТД-32 і ТКР-35, а також стаціонарним твердоміром ТШ-2М, результати яких показують, що покази твердоміра ТД-32 співпадають з фактичними значеннями твердості (коефіцієнт кореляції 0.979). Це підтверджує коректність вибору даного приладу для проведення експериментальних досліджень на відібраних зразках.

У ході вимірювання питомого електричного опору на очищену від забруднень та механічно зачищену в місці контакту зондів поверхню прикладали контактний механізм по центру зразка так, щоб лінія зондів була розміщена вздовж поздовжньої осьової лінії. При цьому було проведено 10-кратні вимірювання питомого електричного опору розробленою експериментальною установкою. Розрахунок питомого електричного опору здійснювався за формулою (1). Вимірювання проводились в однакових лабораторних умовах.

Після цього з повнорозмірних зразків були виготовлені пропорційні візрі і проведено їх руйнівні випробування згідно з ГОСТ 1497-84 з метою визначення дійсних значень границі плинності. Діапазон дійсних значень границі плинності відібраних зразків – 238-492 МПа.

На рис.5 представлено отримані залежності границі плинності конструкційних сталей від твердості та питомого опору. Також на рисунках зображені криві апроксимації.

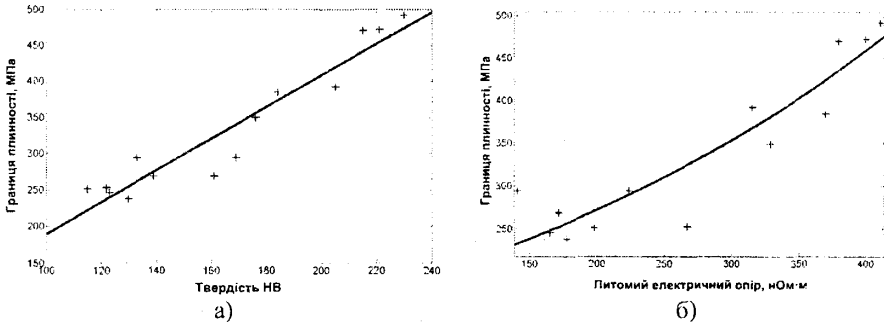


Рис. 5. Залежність границі плинності конструкційних сталей від твердості а) та від питомого електричного опору б)

Параметри апроксимації були такими:

1) залежність границі плинності від твердості апроксимована функцією вигляду  $f(x) = a \cdot x + b$ , де  $a=2.03$ ,  $b=-6.83$ . Середнє квадратичне відхилення (СКВ) апроксимації становить 40.45 МПа. Коефіцієнт кореляції становить 0.91;

2) залежність границі плинності від питомого електричного опору апроксимована функцією вигляду  $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$ , де  $a=156.03$ ,  $b=2.69 \cdot 10^{-3}$ . СКВ апроксимації становить 71.51 МПа. Коефіцієнт кореляції становить 0.69.

Отримані залежності границі плинності від інформативних параметрів носять прямопропорційний характер, що узгоджується з результатами теоретичних досліджень. Коефіцієнти кореляції здебільшого не досягають високих значень, що вказує на нелінійність взаємозв'язку між даними параметрами та границею плинності, а також на необхідність урахування двох параметрів у комплексі.

Для вирішення задачі нелінійної апроксимації границі плинності як функції двох параметрів (питомого електричного опору і твердості) було використано штучні нейронні мережі (ШНМ). Використання ШНМ передбачає процедуру навчання і тестування. Шляхом порівняння тестових виходів натренованих нейронних мереж, можна визначити яка структура мережі є оптимальною. Критерієм відбору є мінімальна похибка визначення границі плинності на тестових зразках.

Набір із 14 сталевих зразків, що досліджувався, був розділений на дві групи:

- *тренувальна* – результати вимірювань на 11 зразках використовувались для тренування нейронних мереж. При цьому для кожного зразка вибиралися по десять виміряних значень кожного інформативного параметра. Таким чином, тренувальна група містила 110 пар вхідних даних;

- *тестова* – осереднені результати 10-кратних вимірювань на 14-ти зразках, що не використовувались для тренування нейронних мереж і використовувалися тільки для тестування. Додатково, дана група містить, в тому числі, осереднені результати вимірювання на трьох зразках, результати досліджень яких не використовувалися для тренування.

Для двох вхідних параметрів було здійснено тренування нейронних мереж чотирьох різних архітектур (10 x 1; 12 x 1; 14 x 1; 16 x 1). Архітектура (12 x 1) означає, що в першому прихованому шарі міститься 12 нейронів, у другому – 1.

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 використовувався алгоритм Левенберга-Марквардта, який використовується для тренування невеликих мереж і характеризується швидким сходженням.

Найкраще здатною до апроксимації границі плинності  $\sigma_T$  від комплексу вхідних параметрів виявилася ШНМ з архітектурою 10x1. Результати тестування нейронної мережі наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати тестування нейронної мережі

Зразок	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Похибка тестування	
															МПа	%
Дійсні значення $\sigma_T$	238	<u>251</u>	253	349	246	<u>294</u>	268	269	384	294	470	392	<u>472</u>	492	26	2.5
Реальні виходи мережі	239	<u>230</u>	259	347	281	<u>314</u>	237	247	269	326	459	352	<u>486</u>	487		

*Примітка: виділені тестові значення границі плинності належать трьом зразкам зі всього набору тестових зразків, вхідні параметри яких не використовувалися у ході тренування мережі та забезпечували процедуру моделювання процесу виконання вимірювання у виробничих умовах*

Було виконано метрологічну оцінку результатів 10-ти кратних вимірювань питомого електричного опору та твердості на кожному зразку, а також відповідні їм розраховані з допомогою нейронної мережі значення границі плинності для трьох тестових зразків. Встановлено, що зведена до діапазону (255 МПа) похибка визначення границі плинності за допомогою розробленого методу не перевищує 2,5% за  $\bar{P}_{\text{до}} = 0.95$ .

Четвертий розділ присвячений розробці, виготовленню та апробації дослідного взірця установки, а також розробленню методики її застосування.

Для перевірки розробленого методу визначення механічних характеристик конструкційних сталей в промислових умовах було розроблено та виготовлено дослідний взірець установки для визначення границі плинності.

Складовий модуль установки, який призначений для вимірювання питомого електричного опору, складається з мікроомметра, чотиризондового вимірювального перетворювача та блоку оброблення інформації.

У вимірювальному перетворювачі зонди круглого перерізу виготовлені зі термостійкої нержавіючої сталі марки 95X18 і загартовані. Діаметр зондів становить 5 мм. Відстань між внутрішніми потенціальними (вимірювальними) зондами становить  $(60 \pm 0,1)$  мм, а між струмовими та відповідними їм потенціальними зондами –  $(10 \pm 0,1)$  мм. В кутах корпусу розміщено чотири упори, які підпружинено пружинами стиску у напрямку корпусу. Підпружинення упор і зондів дозволяє самовстановлюватись корпусу та лінії зондів відносно досліджуваної поверхні з урахуванням її незначних нерівностей. Окрім того, зонди та упори виконуються з можливістю осьового переміщення відносно корпусу, що дозволяє проводити вимірювання питомого електричного опору на циліндричних поверхнях, наприклад, трубах великого діаметру.

У ході вимірювання, з метою встановлення стабільного електричного контакту зондів із об'єктом контролю, на перетворювач через вмонтований стрижень насаджують навантажувальну гантель масою  $(10 \pm 0,05)$  кг.

Живлення модуля вимірювання питомого електричного опору (мікроомметра) розробленого дослідного зразка установки здійснюється від промислової мережі змінного струму  $220 \text{ В} \pm 10\%$  з частотою  $(50 \pm 0,5)$  Гц, а також у промислових умовах можливе живлення від перетворювача напруги на 220 В. Живлення твердоміра та портативного комп'ютера є автономним і здійснюється від власних внутрішніх акумуляторних батарей. Перед вимірюванням питомого електричного опору проводиться вимірювання твердості за шкалою Брінеля за допомогою серійного динамічного твердоміра типу ТД-32, які після цього передаються через клавіатуру в ноутбук зі встановленим спеціалізованим програмним забезпеченням для розрахунку границі плинності.

Загальний вигляд дослідного взірця установки, який використовується для визначення границі плинності конструкційних сталей згідно із запропонованим методом зображено на рис. 6.



Рис. 6. Загальний вигляд дослідної установки

Для методичного забезпечення використання результатів дисертаційної роботи розроблено проект нормативного документу (СОУ), що регламентує методику та порядок визначення механічних характеристик конструкційних сталей.

Промислову апробацію установки було виконано в умовах промислу ТзОВ “Івано-Франківський ”Вторчормет” та ТзОВ “Західхіміс”. Суть промислової апробації полягала в наступному:

1) на металобазі “Західхіміс” відбирались сталні взірці з відомими механічними характеристиками (вказані в сертифікатах на сталі) і здійснювалось вимірювання розробленою установкою;

2) на базі “Вторчормету” відбирались сталні взірці з невідомими наперед механічними характеристиками. Здійснювалось вимірювання розробленою установкою, після чого було проведено руйнівні випробування на розривній машині з метою визначення дійсних значень границі плинності.

В обох випадках значення границі плинності, визначені за допомогою дослідної установки, знаходилися в межах дійсних значень.

## ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-практична проблема – розроблено метод і засіб визначення фактичних механічних характеристик конструкційних сталей і одержано такі основні результати:

1. Аналіз відомих неруйнівних методів і засобів визначення фізико-механічних характеристик сталей показав, що вони мають ряд обмежень щодо встановлення аналітичних залежностей між ФМХ та досліджуваними інформативними параметрами та застосування їх на об’єктах різного призначення,



з різними умовами експлуатації, виготовлених з різних груп сталей. Обґрунтовано необхідність розроблення нових підходів до контролю механічних характеристик конструкційних сталей, зокрема за значеннями їх питомого електричного опору як структурно чутливої фізичної властивості.

2. Розроблено новий метод неруйнівного визначення механічних характеристик сталей (патент України № 87240), який полягає у комплексному врахуванні параметрів питомого електричного опору та твердості, що дозволяє визначати механічні характеристики як функції двох параметрів, використовуючи технології штучних нейронних мереж.

3. Проведено теоретичні дослідження розробленого методу, в результаті чого встановлено можливість вимірювання електроконтактним чотиризондовим методом питомого електричного опору сталевих об'єктів, що дало змогу розрахувати розміри системи зондів з метою підвищення чутливості методу, а також одержати аналітичний вираз для геометричної функції поправки, яка враховує вплив кінцевих розмірів об'єкту контролю на результати вимірювання.

4. За результатами експериментальних досліджень було встановлено наявність і характер залежності границі плинності від обраного комплексу параметрів – прямопропорційний для твердості та для питомого електричного опору. Показано, що даний комплекс параметрів відзначається високими коефіцієнтами кореляції з границею плинності (твердість – 0,91 та питомий електричний опір – 0,69), що дало змогу згідно із розробленим способом визначати границю плинності сталей з приведеною до діапазону похибкою не більшою, ніж 2.5 % за  $\bar{P}_{\text{зад}} = 0.95$ . Використано штучні нейронні мережі для апроксимації границі плинності як функції двох параметрів, що дало змогу підвищити точність визначення механічних характеристик конструкційних сталей.

5. Розроблено та виготовлено дослідний взірець установки для визначення механічних характеристик конструкційних сталей. Проведено промислову апробацію установки в умовах промислу ТзОВ “Івано-Франківський ”Вторчормет” та ТзОВ “Західхіміс”. Розроблено проект методики (СОУ) визначення механічних характеристик конструкційних сталей за допомогою розробленої установки.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Карпаш М.О. Підвищення інформативності визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металокопункцій довготривалої експлуатації / М.О. Карпаш, С.Р. Доценко // Методи та прилади контролю якості. – 2007. - № 18. – С.13-17.

2. Карпаш М.О. Новий підхід до визначення фізико-механічних характеристик сталей з врахуванням їх структури / М.О. Карпаш, С.Р. Доценко, О.М. Карпаш // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів (серія), випуск 13: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій: зб. наук. праць. – Львів, 2008. – С. 203 – 208.

3. Карпаш О.М. Дослідження взаємозв'язку між структурним станом сталей та фізико-механічними характеристиками сталей / О.М. Карпаш, М.О.Карпаш,

Є.Р.Доценко // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: В 2-х т. / Спецвипуск журналу «Фізико-хімічна механіка матеріалів». - №7. - Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2008 – Т. 2. – С.724-729.

4. Карпаш О.М. Питомий електричний опір як інформативний параметр визначення фактичних фізико-механічних характеристик матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації / О.М. Карпаш, Є.Р. Доценко, М.О. Карпаш, А.В. Василик // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2009. – №1. – С. 36-41.

5. Доценко Є.Р. Експериментальні дослідження щодо можливості застосування чотириконтактного електричного методу для контролю питомого електричного опору габаритних сталевих конструкцій / Є.Р.Доценко, О.М. Карпаш, М.О.Карпаш // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2010. - №1. – С.186-191.

6. Доценко С.Р. Математичне моделювання контролю питомого електричного опору матеріалів електроконтактним чотиризондовим методом / Є.Р. Доценко // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ: всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал. – 2010. – №1. – С. 82-90.

7. Доценко Є.Р. Дослідження методу визначення напруження плинності конструкційних сталей за значеннями їх питомого електричного опору / Є.Р. Доценко, М.О. Карпаш, О.М. Карпаш // Методи та прилади контролю якості. – 2010. - № 24. – С. 105-111.

8. Пат. 87240 Україна, МПК G01N 25/02. Спосіб неруйнівного визначення механічних характеристик сталей / Карпаш М.О., Доценко Є.Р., Карпаш О.М.; заявник і власник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. - № а 2008 02389; заяв. 25.02.2008; опуб. 25.06.2009, Бюл. №12. – 3с.

9. Karpash M. New challenges for mechanical properties evaluation of long-term used metallic structures / M. Karpash, O. Karpash, E. Dotsenko // 4<sup>th</sup> International Symposium on Hydrocarbons and Chemistry, Ghardaia, Algeria, March 24-26, 2008 : Proceedings. – Ghardaia, 2008. - С.64.

10. Карпаш О.М. Визначення фактичних фізико-механічних характеристик сталей металоконструкцій довготривалої експлуатації із врахуванням структури / О.М. Карпаш, М.О. Карпаш, Є.Р. Доценко // Організація неразрушаючого контролю якості продукції в промисловості: 4-а наук.-практ. конф., Таба, Єгипет, 18-25 квітня 2008 р.: тези конф. – Таба, 2008. – С.4.

11. Карпаш М.О. Розроблення нових неруйнівних методів визначення фактичних фізико-механічних характеристик сталевих трубопроводів / М.О.Карпаш, Є.Р.Доценко, О.М.Карпаш // Міцність та надійність магістральних трубопроводів: міжнародна н/т конф., Київ, 5-7 червня 2008 р.: тези конф. - Київ, 2008. - С.44-45.

12. Доценко Є.Р. Аналіз та обґрунтування взаємозв'язку фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій із структурним станом / Є.Р. Доценко // Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії: Міжнародна н/т конф. молодих учених, Івано-Франківськ, 16-20 вересня 2008р.: анотації. - Івано-Франківськ: Факел, 2008. - С.56.

13. Карпаш М.О. Питомий електричний опір як інформативний параметр визначення фактичних фізико-механічних характеристик конструкційних сталей / М.О.Карпаш, С.Р.Доценко, О.М.Карпаш // Сучасне матеріалознавство - матеріали та технології: Всеукраїнська конф. молодих вчених, Київ, 12-14 листопада 2008 р.: тези. – Київ, 2008. - С.233.

14. Karpash M. Evaluation of mechanical properties of steels using neural network approach / M. Karpash, O. Karpash, E. Dotsenko // Scientific bulletin of The international conference of the Carpathian Euro-region specialists in industrial systems, Baia Mare, 2008. - 7-th edition. - Ser. C. - Vol. 22. - P.239-244.

15. Карпаш М.О. Експериментальні дослідження щодо визначення фактичних фізико-механічних характеристик конструкційних сталей / М.О.Карпаш, С.Р.Доценко, Б.Я. Данилюк // Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання: 5-а Міжнародна науково-технічна конференція і виставка, 2-5 грудня 2008 р.: тези. – Івано-Франківськ: Факел, 2008. - С.98-100.

16. Карпаш О.М. Проблемні питання визначення питомого електричного опору феромагнітних сталей / О.М. Карпаш, Є.Р. Доценко, М.О. Карпаш // Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2009 : 6-а національна науково-технічна конф., 9 – 12 червня 2009 р. : збірник доповідей. - К.: УТ НКГД, 2009. – С.308-311.

17. Доценко Є.Р. Експериментальні дослідження щодо перспективи застосування чотирьохконтактного методу для визначення питомого електричного опору габаритних металоконструкцій / Є.Р. Доценко, О.М. Карпаш, М.О. Карпаш, Н.Паріда // Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи : міжнародна науково-технічна конференція, 20 – 23 жовтня 2009 р. : збірник анотацій. – Івано-Франківськ : Факел, 2009. – С. 114.

18. Karpash O. Experimental investigation for electrical resistivity measurement of metallic structures using four-point method / O. Karpash, Ye. Dotsenko, M. Karpash // Hydrocarbons and Chemistry: 5<sup>th</sup> International Symposium, Sidi Fredj, Algiers, May 23-25, 2010: proceedings. - Sidi Fredj, 2010. - P.112.

19. Доценко Є.Р. Застосування чотирьохконтактного методу для визначення питомого електричного опору металоконструкцій – проблеми та перспективи / Є.Р. Доценко, О.М. Карпаш // Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: II науково-практична конференція студентів і молодих учених, 25-26 листопада 2009 р.: збірник тез доповідей. – Івано-Франківськ: Факел, 2009. – С. 44-45.

20. Карпаш О.М. Теоретичні аспекти контролю питомого електричного опору сталей чотирьохзондовим методом / О.М. Карпаш, Є.Р. Доценко, М.О. Карпаш // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів «Лесотест-2010»: 15 Міжнар. наук.-техн. конф., Славське, 15-20 лютого 2010 р.: матер. конф. – Львів, 2010. – С.53-54.

## АНОТАЦІЯ

**Доценко Є.Р. Контроль механічних характеристик конструкційних сталей за їх питомим електричним опором. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2010.

Дисертація присвячена питанню визначення механічних характеристик конструкційних сталей, що використовуються в базових галузях вітчизняної промисловості.

Досліджено взаємозв'язок питомого електричного опору з їх механічними характеристиками. Розроблено метод визначення механічних характеристик сталей, який полягає у комплексному врахуванні двох інформативних параметрів (питомого електричного опору та твердості). Розроблено математичну модель процесу контролю питомого електричного опору контактним чотиризондовим методом. Встановлено аналітичний вираз для геометричної функції поправки, яку необхідно вводити у формулу розрахунку питомого опору. Проведено експериментальні випробування експериментальної установки. Розроблено та виготовлено дослідний взірець установки для визначення механічних характеристик сталей. Розроблено проект нормативного документу (СОУ) визначення механічних характеристик сталей.

**Ключові слова:** механічні характеристики, конструкційні сталі, комплексний підхід, питомий електричний опір, твердість, штучні нейронні мережі.

## АННОТАЦИЯ

**Доценко Е.Р. Контроль механических свойств конструкционных сталей по их удельному электрическому сопротивлению. – Рукопись.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск, 2010.

Диссертация посвящена вопросу определения механических свойств конструкционных сталей, используемых в базовых отраслях отечественной промышленности.

В первом разделе проведен анализ методов и средств определения механических свойств сталей. Представлены их преимущества и недостатки.

Анализ показал, что современные методы неразрушающего контроля (магнитный, акустический, термoeлектрический, вихретоковый) при их индивидуальном применении не позволяют достаточно точно определять механические свойства сталей, кроме того применения того или иного метода контроля механических свойств ограничивается, как правило, определенными марками или группами прочности сталей. Решение данной проблемы может быть найдено путем применения комплексного подхода, который предусматривает

измерение нескольких информативных параметров. Обоснован выбор в качестве информативного параметра контроля механических свойств конструкционных сталей удельного электрического сопротивления как структурно чувствительной физической характеристики, которая регламентируется в нормативной документации на стали. Проанализированы существующие методы измерения удельного электрического сопротивления сталей и обоснован выбор электроконтактного четырехзондового метода измерения.

Второй раздел посвящен теоретическим исследованием нового метода определения механических характеристик конструкционных сталей, который заключается в учете нескольких информативных параметров и использовании искусственных нейронных сетей для установления взаимосвязей между исследуемыми характеристиками. В частности путем корреляционного и графического анализа, а также теоретических исследований как информативные параметры контроля предела текучести, выбрано следующий комплекс параметров: твердость и удельное электрическое сопротивление. Используя отклонения в законе Видемана-Франца для иностранных марок сталей, показано, что удельное электрическое сопротивление лучше коррелирует с механическими свойствами в пределах отдельных структур. Приведено теоретическое объяснение взаимосвязей между механическими свойствами и удельным электрическим сопротивлением. Проведено математическое моделирование процесса контроля удельного сопротивления электроконтактным четырехзондовым методом, что позволило рассчитать расстояния между зондами измерительного преобразователя для повышения чувствительности метода, а также установить аналитическую зависимость для геометрической функции поправки, которую необходимо учитывать при расчете удельного электрического сопротивления плоских образцов правильной геометрической формы. Аналитическая зависимость для геометрической функции поправки получена, используя метод зеркальных отображений. Показано, что, если размеры образца намного крупнее линейных размеров системы зондов, то геометрическая функция поправки сводится к конкретному числу, которое зависит только от соотношения расстояний между зондами. Анализ возможности измерения выбранных параметров показал, что с удовлетворительной точностью измерения твердости можно выполнять серийными динамическими твердомерами типа ТД-32, а для измерения удельного электрического сопротивления сталей необходимо, в первую очередь, разработать четырехзондовый контактный механизм по результатам математического моделирования.

В третьем разделе приведены методика и результаты экспериментальных исследований с целью проверки разработанного метода контроля механических характеристик конструкционных сталей. Разработана экспериментальная установка для определения удельного электрического сопротивления сталей, реализующая четырехзондовый метод, в частности предложено техническое решение по конструкции контактного механизма, разработанного по результатам математического моделирования. Установлено экспериментальным путем, что разработана математическая модель контроля удельного электрического сопротивления четырехзондовым методом адекватна реальному процессу контроля, в частности

зависимость геометрической функции поправки от ширины объекта контроля повторяет теоретическую кривую. Проведены экспериментальные исследования по проверке разработанного метода на примере 14 образцов из конструкционных сталей. Результаты исследований (погрешность определения предела текучести составляет 26 МПа) подтверждают ранее сделанные теоретические выводы относительно выбора комплекса параметров (твердость, удельное электрическое сопротивление) как оптимальных для определения предела текучести. Проведено метрологическую оценку результатов многократных косвенных измерений предела текучести на базе алгоритмов искусственных нейронных сетей. Приведенная к диапазону погрешность определения предела текучести образцов из конструкционных сталей согласно предложенным методом не превышает 2.5% при  $\bar{P}_{\text{ин}} = 0.95$ .

Четвертый раздел посвящен разработке, изготовлению и апробации опытного образца установки в промышленных условиях. Описанная конструкция установки, устройство и работа основных узлов. Разработан и представлен алгоритм работы программного обеспечения для обработки измерительной информации. Проведена апробация установки в условиях промысла ООО "Ивано-Франковский "Вторчермет" и ООО "Захидхимлис". Разработан проект Стандарта организации Украины (методики) неразрушающего контроля механических свойств сталей в промышленности.

**Ключевые слова:** механические свойства, конструкционные стали, комплексный подход, удельное электрическое сопротивление, твердость, искусственные нейронные сети.

## ABSTRACTS

**Dotsenko Ye.R. Determining of structural steels' mechanical properties by their electrical resistivity. – Manuscript.**

Dissertation on competition of scientific degree of the candidate of engineering sciences at specialty 05.11.13 – Instruments and methods of control and composition of material determination. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2010.

Dissertation is devoted to the issue of determining the materials' mechanical properties that are used in key branches of Ukrainian industry.

It is investigated the relation between electrical resistivity and their mechanical properties. The method of steels' mechanical properties determining is developed. This method is based on considering two informative parameters (electrical resistivity and hardness). It is developed the mathematical model of electrical resistivity control using four-point technique. The analytical expression for geometrical function of correction that should be putted in the electrical resistivity formula is developed. The experimental investigations of experimental facility were carried out. The experimental sample of the facility for mechanical properties determining is developed and manufactured. A draft of normative document (SOU) on mechanical properties determining was developed.

**Key words:** mechanical properties, construction steels, complex approach, electrical resistivity, hardness, artificial neural networks.