

На правах рукопису



УДК 620.179

**ДОЦЕНКО ЄВГЕН РОМАНОВИЧ**

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

**Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю та  
визначення складу речовин**

**Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Науковий керівник:  
кандидат технічних наук,  
Карпаш М. О.**

**Івано-Франківськ – 2010**

d373



## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>5</b>
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ.....</b>	<b>11</b>
1.1 Характеристика об'єкту контролю та істотних чинників.....	11
1.2 Аналіз відомих методів і засобів контролю механічних характеристик сталей.....	17
1.2.1 Магнітні методи контролю механічних характеристик конструкційних сталей .....	19
1.2.2 Акустичний контроль механічних характеристик сталей.....	24
1.2.3 Термоелектричний контроль механічних характеристик матеріалів.....	27
1.2.4 Вихрострумний метод контролю.....	29
1.2.5 Методи вимірювання питомого електричного опору сталей.....	30
1.3 Вибір та обґрунтування напрямку досліджень.....	35
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>ТЕОРЕТИЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ.....</b>	<b>37</b>
2.1 Теоретичні дослідження методу.....	38
2.1.1 Дослідження взаємозв'язку між структурним станом сталей та їх фізико-механічними характеристиками.....	38
2.1.2 Пояснення зв'язку питомого електричного опору сталей з їх механічними характеристиками.....	46
2.2 Вибір технічних засобів вимірювання інформативних параметрів .....	51
2.2.1 Вимірювання твердості.....	51

2.2.2	Вимірювання питомого електричного опору.....	51
2.3	Математичне моделювання процесу вимірювання питомого електричного опору електроконтактним чотиризондовим методом ..	53
2.3.1	Теоретичні дослідження щодо підвищення чутливості чотиризондового методу та розрахунку взаємного розміщення зондів.....	59
2.3.2	Застосування методу до зразків простої геометричної форми.....	61
	Висновки до розділу .....	72

### **РОЗДІЛ 3**

	<b>ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ .....</b>	<b>74</b>
3.1	Розроблення експериментальної установки.....	74
3.2	Методика експериментальних досліджень.....	78
3.3	Результати експериментальних досліджень.....	82
3.3.1	Порівняльні дослідження портативних і стаціонарних твердомірів.....	83
3.3.2	Лабораторні дослідження механічних характеристик сталей розробленим методом.....	86
3.4	Метрологічна оцінка розробленого методу контролю.....	94
3.4.1	Аналіз похибки опосередкованого вимірювання питомого електричного опору чотиризондовим методом.....	94
3.4.2	Аналіз похибки опосередкованого визначення границі плинності сталей.....	97
	Висновки до розділу.....	104

**РОЗДІЛ 4****РОЗРОБЛЕННЯ ДОСЛІДНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВЗІРЦЯ****УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК****КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ТА МЕТОДИКИ ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ.106**

4.1 Розроблення дослідного взірця установки для визначення механічних характеристик конструкційних сталей .....	107
4.2 Розроблення проекту нормативного документу (методики) визначення механічних характеристик конструкційних сталей .....	113
4.3 Промислова апробація дослідно-експериментальної установки .....	120
Висновки до розділу .....	123
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>125</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>127</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>141</b>

## ВСТУП

### 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, тепла 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 безпосередньою 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 схемотехніки 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 "Західхімліс"), 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 сталених 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

Євро регіону (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.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

#### 1.1. Характеристика об'єкта контролю та істотних чинників

За оцінкою спеціалістів, технічний стан споруд, конструкцій, обладнання та інженерних мереж в основних галузях економіки досяг критичної межі, що загрожує її сталому функціонуванню, підвищує імовірність виникнення аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру. З огляду на надзвичайно низькі темпи відновлення першочерговим завданням є забезпечення надійної експлуатації існуючого фонду споруд і конструкцій. Це, в першу чергу, відноситься до об'єктів теплової і ядерної енергетики, нафтогазопроводів, хімічної промисловості, транспорту, промислового будівництва.

Зношення обладнання у базових галузях промисловості наближається до граничного рівня щодо умов надійності його експлуатації. Зниження рівня надійності призводить до відмов і, як наслідок, до збільшення витрат на проведення відновлювально-ремонтних робіт, до збитків від недоотриманого прибутку, високої аварійності з дуже серйозними екологічними наслідками та людськими жертвами.

З огляду на це особливої актуальності набувають питання управління експлуатаційною надійністю та довговічністю відповідних об'єктів шляхом визначення їх технічного стану і залишкового ресурсу та встановлення науково обґрунтованих строків експлуатації [1].

Насамперед необхідно проаналізувати істотні чинники, які впливають на довговічність сталевих конструкцій тривалої експлуатації в промисловості (рис.1.1).



Рис.1.1. Чинники, що впливають на довговічність сталевих конструкцій тривалої експлуатації

Сукупний вплив різних чинників може призводити до такого явища як деформаційне старіння сталей конструкцій, яке виявляється тільки за умов довготривалої експлуатації (понад 20 років). Старіння металу в першу чергу виявляється в тому, що метал стає більш крихким, знижується запас пластичності. До деформаційного старіння більш схильні нафтогазопроводи [2, 3], більшість з яких побудовані ще до 70-х р.р. 20 ст., і нормативний термін експлуатування яких вже закінчився або підходить до завершення.

Найбільш небезпечними з точки зору експлуатаційної міцності та надійності сталевих конструкцій є поява пластичних незворотних деформацій. Таке можливо тільки за умов досягнення у локальному об'ємі металу напружень, що перевищують значення границі плинності [4].

Таким чином, процес деформаційного старіння маловуглецевих та низьколегованих сталей (використовуються як матеріал нафтогазопроводів)

включає в себе всі основні механізми [5]: накопичення незворотних мікропластичних напружень (рух дислокацій), перерозподіл атомів вуглецю, азоту та інших елементів, взаємодія домішкових атомів зі дислокаціями, розпад цементиту, що знайшло підтвердження в [6] (рис.1.2) та утворення нових карбідних частинок, утворення мікротріщин при накопиченні однойменних дислокацій біля різних перешкод (меж зерен, субзерен, домішкових атомів, вакансій).

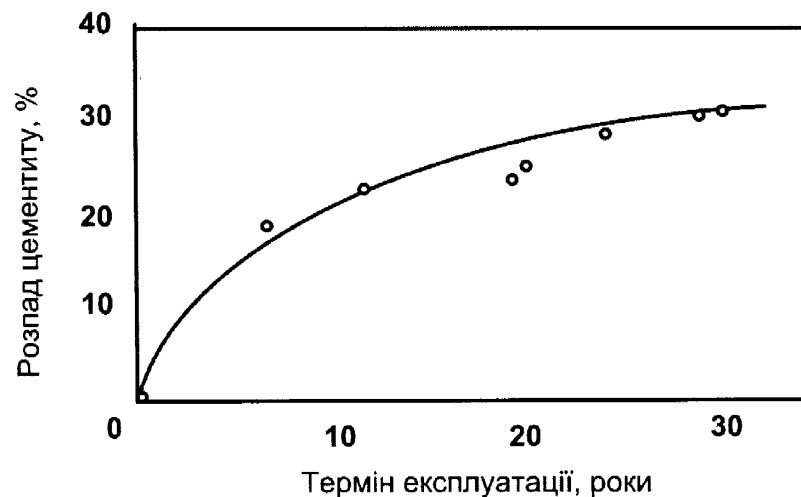


Рис. 1.2. Залежність кількості цементиту, що розпався, в сталі в залежності від терміну експлуатації (дані для сталей різних марок)

Як показує досвід, більшість сталевих конструкцій вітчизняної промисловості, що експлуатуються тривалий час у важких умовах, перебувають на стадії старіння. Такий стан може призводити до зростання кількості відмов та аварій.

Для запобігання вказаних тенденцій та з метою вирішення завдання технологічної безпеки в базових галузях промисловості була створена державна науково-технічна програма „Ресурс” [1]. Згідно уточненої Концепції цільової комплексної програми «Ресурс» на 2010-2012 р.р., одним із пріоритетних напрямків досліджень є розробка ефективних неруйнівних методів і засобів для оцінювання напружених станів конструкцій і фізико-механічних характеристик матеріалів в умовах експлуатації та їх деградації.

Аналіз показав [7], що у ході тривалої експлуатації сталевих конструкцій зміна механічних характеристик сталей виражаються з одної сторони в зміні показників міцності (збільшуються здебільшого на 10-15%), з іншої сторони – в зниженні в'язко-пластичних показників (на 5-7%) і показників опору крихкому руйнуванню (на 15-20%) порівнянні зі своїми номінальними значеннями (рис.1.3).

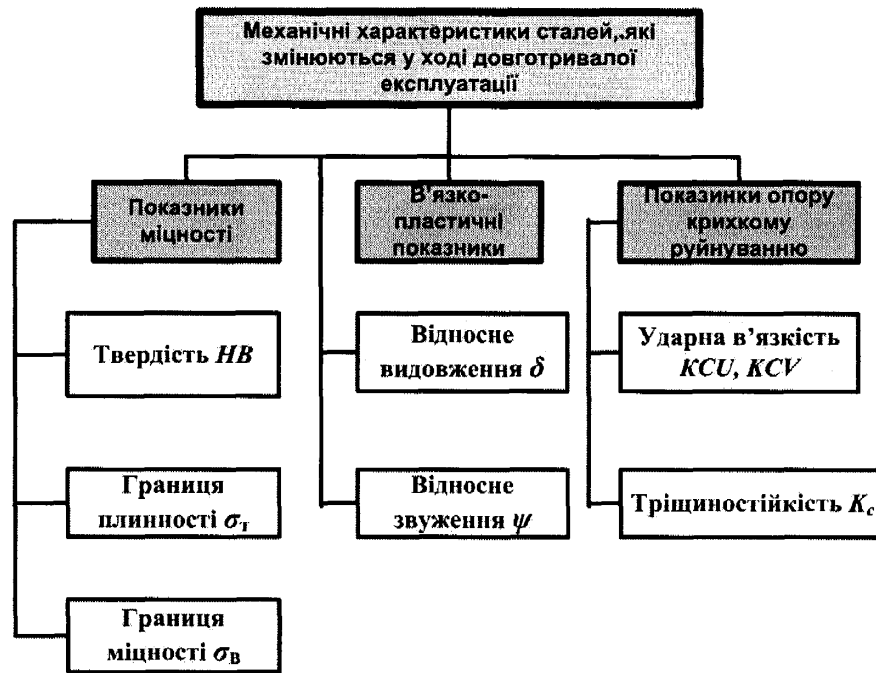


Рис.1.3. Механічні характеристики сталей, які змінюються у ході довготривалої експлуатації металоконструкцій

Вказані характеристики нормуються у вітчизняних та іноземних (згідно з вимогами стандартів серії *ASTM*) стандартах на сталі.

Поряд з механічними характеристиками сталей змінюються також і їх фізичні властивості, насамперед структурно чутливі. Це вказує на можливий взаємозв'язок деяких фізичних та механічних характеристик на мікроструктурному рівні. На рис.1.4 наведено узагальнену схему впливу умов експлуатації та зовнішніх чинників на зміни фізичних та механічних властивостей сталі, які зумовлені, в першу чергу, мікроструктурними змінами в металі. Структурно чутливі фізичні властивості сталей (електричні, теплові, магнітні) однозначно реагують на будь-які мікроструктурні зміни, що

виникають внаслідок деградації металу. З іншого боку, такі зміни призводять і до деградації механічних характеристик. Однакові процеси, які впливають на зміну як фізичних так і механічних характеристик, дають підстави стверджувати, що на вказані структурно чутливі фізичні властивості повинна бути (а в багатьох випадках і є) зосереджена основна увага з точки зору використання їх як інформативних параметрів контролю механічних характеристик сталей [8]. Проте в реальних умовах експлуатування сталевих конструкцій є досить важко (або і неможливо) вимірювати деякі фізичні властивості. Це, в першу чергу, стосується електричних і теплових властивостей.

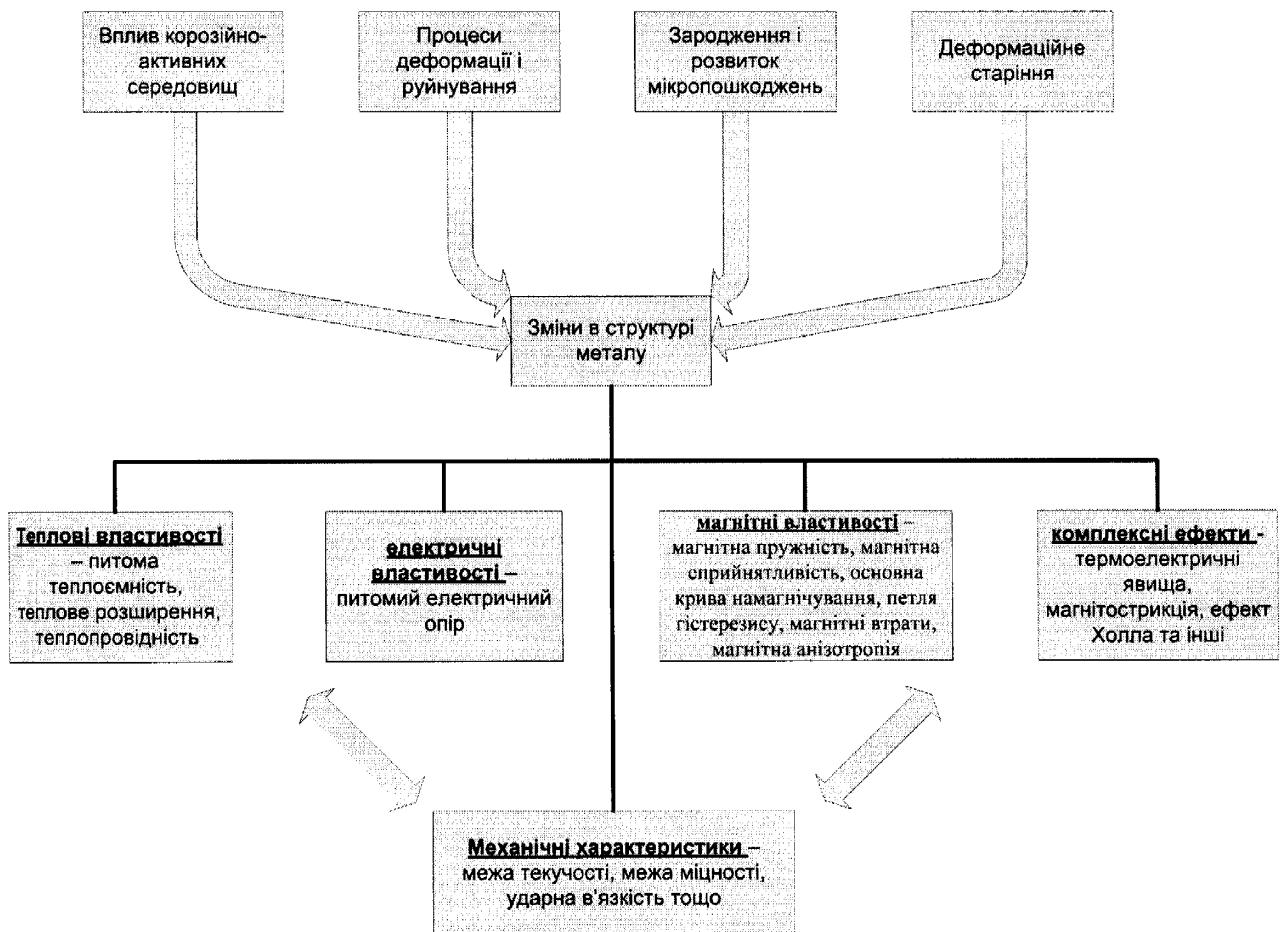


Рис.1.4. Вплив істотних чинників на зміну фізико-механічних характеристик сталей

Визначення механічних характеристик сталей є актуальною задачею не тільки для оцінки фактичного технічного стану металоконструкцій тривалої

експлуатації. Так, зокрема, широкий діапазон металевих матеріалів, що використовуються для виробництва конструкцій відповідального призначення, різноманітність технологічних маршрутів, які формують фізико-механічні властивості, потребують 100%-го контролю поставленої на підприємство номенклатури з метою її ідентифікації, а також поопераційного контролю фізико-механічних характеристик, які формуються у ході обробки.

Окрім режимів термічного оброблення на механічні характеристики вуглецевих сталей впливає також і їх хімічний склад. Так, основними складовими вуглецевих сталей окрім заліза (97.9...99.5%) та вуглецю (до 2.14%) є ряд елементів, наявність яких викликана технологічними умовами виробництва (марганець, кремній), чи неможливістю повного видалення (сірка, фосфор, кисень, водень, азот), а також випадкові домішки (хром, нікель, мідь та ін.).

Основний вплив на властивості сталей зумовлює вуглець. З підвищенням вмісту вуглецю збільшується твердість і границя плинності, але при цьому зменшується в'язкість і пластичність [9].

Таким чином, об'єктом дослідження є конструкційні сталі, які використовують для виготовлення відповідальних конструкцій у вітчизняній промисловості, і для яких необхідно проводити контроль механічних характеристик (чи для оцінки деградації металу під час тривалої експлуатації чи для проведення вхідного або поопераційного контролю поставленої на підприємство продукції) – рис.1.5.

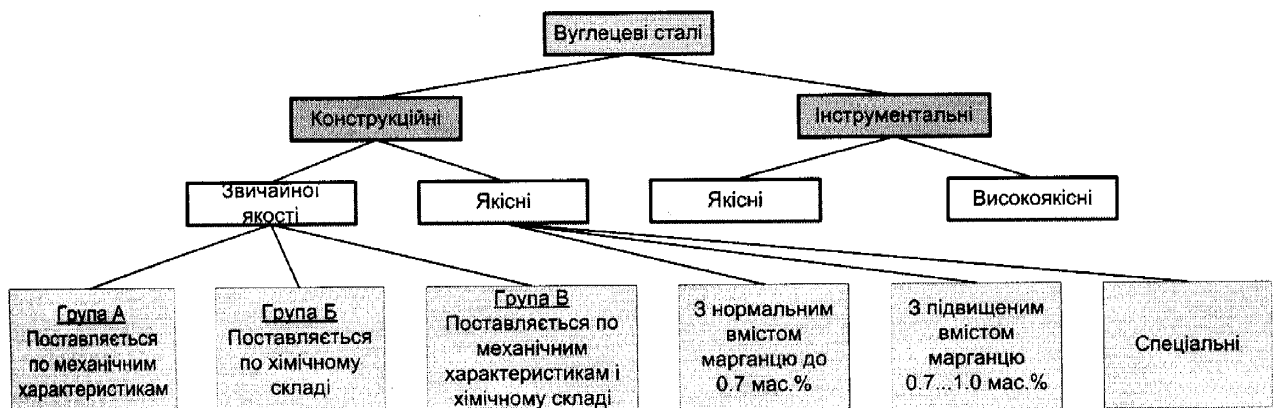


Рис.1.5. Класифікація вуглецевих сталей по призначенню



Цілком очевидно, що найбільш економічно та технічно доцільно в даному випадку використовувати методи неруйнівного контролю [10], причому технічні засоби, що їх реалізують, повинні бути переносними та універсальними з точки зору можливості їх використання на різних об'єктах контролю [11].

## 1.2. Аналіз відомих методів і засобів контролю механічних характеристик сталей

Механічні характеристики конструкційних сталей можна визначати як руйнівними так і неруйнівними методами [12]. Зрозуміло, що визначення руйнівними методами вимагає втручання в цілісність робочої конструкції, що не завжди представляється можливим і виправданим, як з технологічної, так і з економічної точки зору.

Багато вітчизняних та зарубіжних вчених, таких як Міхеєв М.Н., Горкунов Э.С., Біда Г.В., Костін В.Н., Мельгуй М.А., Дорофеев А.Л., Яцун М.А., Бондаренко Ю.К., Шарко А.В., Безлюдько Г.Я., Карпаш М.О., Молодецький І.А., Учанін В.М., Kroning M., Z. Guo, W. Sha, M. Balazinski, M.Saka, J. W. Byeon, S.H. Nahm, A. Kim доклали зусиль для розвитку нових методів, підходів та технічних засобів контролю фізико-механічних характеристик металевих виробів.

Існує стандартна класифікація неруйнівних методів контролю, які відрізняються один від одного по характеру взаємодії фізичних полів з об'єктом контролю і способам отримання первинної інформації [10]. Дана класифікація введена для методів і засобів дефектоскопії й застосовується в даний час для класифікації методів і засобів визначення фізико-механічних характеристик матеріалів. Проте вона носить формальний характер, розділяючи все різноманіття неруйнівних методів діагностики скоріше по способу виділення використаного ефекту, ніж по типу фізичних полів. Однак, при вирішенні завдань наступного, більш високого рівня складності - завдань



визначення властивостей матеріалів, зокрема механічних характеристик, необхідно провести більш чіткий поділ методів саме по типу фізичних полів.

На рис.1.6 наведено класифікацію відомих методів визначення механічних і фізичних характеристик сталей по типу фізичних полів.

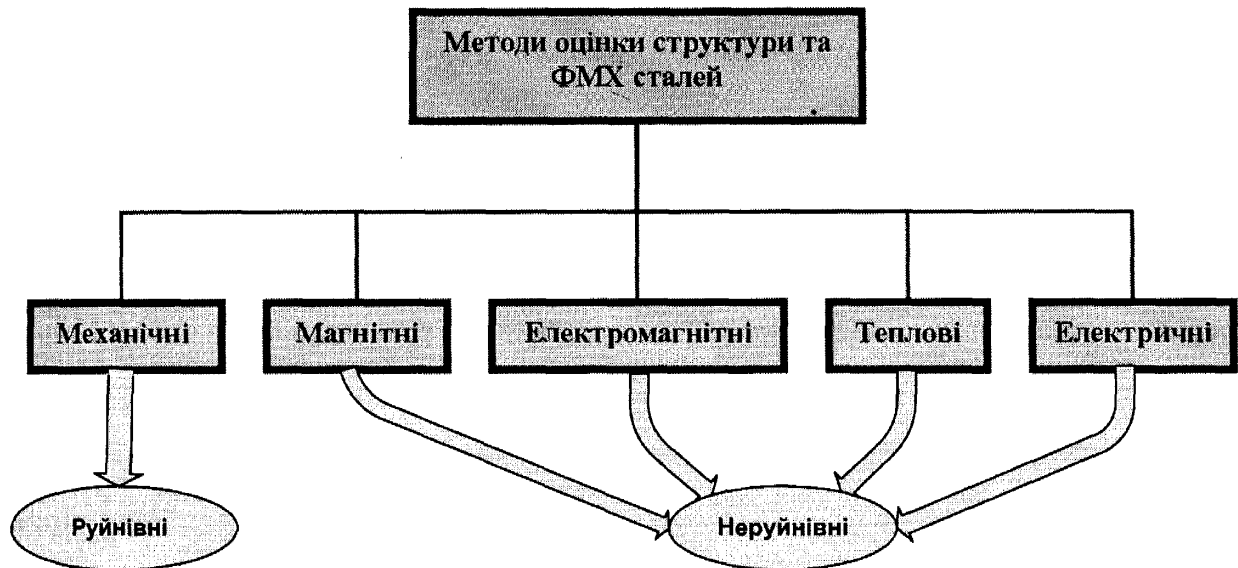


Рис.1.6. Класифікація методів визначення механічних характеристик сталей по типу фізичних полів

До механічних методів контролю механічних характеристик матеріалу відносяться різні види статичних і динамічних методів виміру твердості (характеризує властивість поверхні твердого тіла чинити опір вдавлюванню або дряпанню) й інших механічних характеристик матеріалів, що використовують результати контактної взаємодії пробного тіла - індентора й досліджуваного матеріалу. Слід зазначити, що на дослідженні взаємодії індентора із контрольованим виробом базується велика група методів визначення механічних характеристик за допомогою емпіричних залежностей між ними і значеннями твердості, які визначаються при вдавлюванні індентора [13-15]. Тому на сьогоднішній день вимірювання твердості є одним з основних методів визначення механічних характеристик сталей.

Необхідно зазначити, що на сьогоднішній день, окрім стандартних, розроблено також комплексні підходи [16, 17] для оцінки механічних

характеристик сталей з врахуванням кількох інформативних параметрів одночасно. Особливий інтерес представляють методи, які враховують інформативні параметри, що відносяться до різних типів фізичних полів [18]. Розробка нових методів багатопараметрового контролю вимагає вирішення двох головних питань [19]: 1) вибір оптимального набору параметрів контролю; 2) розробка (чи вибір наявних) відповідних вимірювальних засобів.

### 1.2.1. Магнітні методи контролю механічних характеристик конструкційних сталей

Для контролю механічних характеристик матеріалів на даний час широко застосовується магнітні методи неруйнівного контролю і застосовується для контролю виробів із феромагнітних матеріалів. Операція намагнічування для даного виду контролю є обов'язковою.

Дослідженнями, що проводилися десятиліттями, встановлена наявність закономірних зв'язків між структурним станом, хімічним та фазовим складом, механічними характеристиками матеріалів, з однієї сторони, магнітними, - з другої. Зокрема, все це послужило основою розвитку одного з напрямків фізики неруйнівного контролю – магнітного структурного аналізу сталей та сплавів, що розвивається на стику двох наук: фізики магнітних явищ та магнітного матеріалознавства [20].

Наявні в даний час більше чи менше систематизовані дані [21, 22] дозволяють виділити наступну групу магнітних властивостей, які найбільш часто рекомендувались та використовувались для структуроскопії та визначення механічних характеристик феромагнітних матеріалів:

- 1) Намагніченість насичення  $M_s$  (чи відповідна індукція  $B_s$ ); 2) Коерцитивна сила  $H_c$ ; 3) Залишкова намагніченість  $M_r$  (або індукція  $B_r$ ); 4) Релаксаційна коерцитивна сила  $I_r$ ; 5) Початкова магнітна сприйнятливість  $\chi_a$  (або проникність  $\mu_a$ ); 6) Коефіцієнт Релея  $b$ ; 7) Максимальна магнітна сприйнятливість  $\chi_{max}$  (або проникність  $\mu_{max}$ ); 8) Поле максимальної магнітної

проникності  $H_{\mu, max}$ ; 9) Релаксаційна намагніченість  $M_{Hr}$  (або індукція  $B_{Hr}$ ); 10) Залишкова намагніченість, отримана після зменшення до нуля коерцитивного поля  $M_{Hc}$  (або відповідна індукція  $B_{Hc}$ ); 11) Релаксаційна магнітна сприйнятливість  $\chi_r = \frac{M_{Hr}}{H_r}$  (або проникність  $\mu_r$ ); 12) Магнітна сприйнятливість на кривій повернення від коерцитивного поля  $\chi_{rc} = \frac{M_{Hc}}{H_c}$  (або проникність  $\mu_{rc}$ ).

Слід відмітити, що в даному переліку чотири параметра характеризують криву намагнічування і для їх вимірювання потрібне ретельне розмагнічування контрольних об'єктів. Для відбору в групу основних параметрів багатьма ученими було оцінено наявність лінійної кореляції між вказаними властивостями. Крім того, було проаналізовано співвідношення властивостей, що визначаються на петлі гістерезису, - чи являються вони незалежними і чи не можна обмежитися тільки параметрами граничної петлі гістерезису.

В різних джерелах [23, 24] приводиться цілий ряд співвідношень між магнітними властивостями полікристалічних феромагнетиків. З робіт [16, 25] відомо, що до основних магнітних параметрів відносяться коерцитивна сила  $H_c$ , намагніченість насичення  $M_s$  та залишкова намагніченість  $M_r$ . Магнітні параметри основної групи володіють різною структурною чутливістю і можуть бути використані як окремо (однопараметровий контроль) так і в сукупності.

Враховуючи вищесказане і провівши детальний аналіз, можна сказати, що на даний час для вимірювання механічних характеристик найбільш широкого використання набули методи магнітного контролю, зображених на рис.1.7.

Широке застосування коерцитиметричних методів контролю завдячує високій чутливості значення коерцитивної сили  $H_c$  до структурних змін і фазових перетворень, достатній простоті та можливості проведення вимірювання в локальних ділянках виробів [26]. Проте, навіть в тих випадках, коли із довідкової літератури відомий зв'язок коерцитивної сили із потрібним механічним параметром (твердістю, границею плинності [27], ударною

в'язкістю [6] і т.д.), необхідно встановлювати можливість його використання при коерцитиметричному контролі конкретних конструкцій в умовах виробництва.

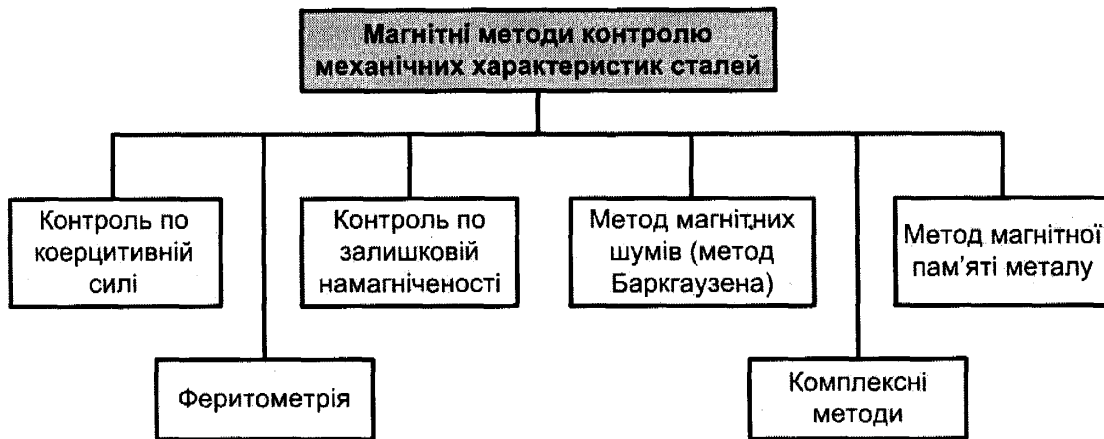


Рис.1.7. Сучасні магнітні методи контролю механічних характеристик сталей

Широкого поширення в даний час зазнали коерцитиметри із приставним електромагнітом, які є зручними для застосування в виробничих умовах. В результаті спільної роботи підприємства НПФ "СНР (м. Харків) і ЗАТ "НИИИИ МНПО «Спектр»" була розроблена серія приладів-структроскопів, призначених для вимірювання величини коерцитивної сили. Базовим приладом є прилад КРМ-Ц. На базі приладу КРМ-Ц була розроблена серія приладів, забезпечених автономним джерелом живлення. Останньою модифікацією даної серії приладів є структуроскоп КРМ-Ц-КЗ, забезпечений вбудованим мікропроцесором.

Недоліком коерцитиметрів з приставними електромагнітами є залежність показів приладу від товщини зазору між електромагнітом та об'єктом контролю, а також від товщини сталюого об'єкта [28].

В патенті [29] описаний автоматичний коерцитиметр для швидкого вимірювання коерцитивної сили матеріалів і елементів конструкцій.

В даний час при розробці коерцитиметрів використовують нові технічні рішення, завдяки яким можна зменшити масу та габарити блока магнітних вимірювань, а також інструментальні похибки вимірювання коерцитивної сили [30].

Контроль по залишковій намагніченості використовується для сталей, для яких відомий зв'язок залишкової індукції або намагніченості із механічними властивостями [31]. Дуже ефективним в таких випадках є імпульсне намагнічування з допомогою соленоїда, яке використовується в імпульсних магнітних аналізаторах. Намагнічування в даному випадку здійснюється з допомогою малогабаритного соленоїда, який встановлюється перпендикулярно поверхні об'єкта контролю.

При пропусканні імпульсу струму через соленоїд ділянка об'єкта контролю намагнічується неоднорідно, а після закінчення імпульсу намагніченість в кожній точці зменшується до певної залишкової намагніченості. Два ферозонда, ввімкнених по схемі градієнтометра, вимірюють різницю напруженостей магнітного поля в точках  $\Delta H$ . Вона характеризує механічні властивості матеріалу об'єкта контролю.

Застосування ефекту Баркгаузена (методу магнітних шумів) для визначення механічних характеристик феромагнітних матеріалів в даний час знаходиться в стадії розвитку. Ефект стрибкоподібної зміни намагніченості відкритий німецьким вченим Г.Баркгаузенем і спостерігається при збільшеному масштабі залежності  $B(H)$ . Стрибкоподібна зміна намагніченості, тобто виникнення магнітних шумів, проходить як при змінах напруженості зовнішнього магнітного поля, так і при механічних навантаженнях. При перемагнічуванні феромагнітного об'єкта змінним магнітним полем частотний спектр індукції має як дискретні складові, які є кратними частоті, так і суцільну складову, яка носить назву магнітного шуму.

На основі досліджених публікацій [32] можна сказати, що магнітошумова структуроскопія має хороші перспективи завдяки високій чутливості методу і можливості відлаштування від багатьох факторів завад.

Магнітне поле можна з достатньою точністю задати за допомогою електромагніта. В матеріалах, які мають «додатну магнітну анізотропію» (до них відносяться сталі), при стисненні метала інтенсивність шуму Баркгаузена знижується, а при розтязі – збільшується.

Саме цей ефект використовується в таких відомих приладах як StressScan 500C і PollScan-200. Час вимірювання в одній точці до 2 секунд, який є цілком прийнятним на практиці. Для контролю поверхневого зміцнення, ступені дисперсності структури, а також вмісту немагнітної фази застосовують магніто шумовий аналізатор МАША-1.

Аналізуючи відомі методи магнітного контролю механічних характеристик, доцільно згадати про магнітометричний метод (метод магнітної пам'яті металу), який є досить ефективним для визначення напружень в металі [33]. Він використовує можливості неруйнівного контролю, механіки руйнування, матеріалознавства. Метод базується на використанні незворотних змін магнітного стану феромагнітних матеріалів у зоні концентрації напружень і деформацій, при яких відбувається напрямлена та незворотна переорієнтація доменної структури магнітострикційної природи, яка залишається і після зняття навантаження. Встановлено, що зміна залишкової намагніченості феромагнітних матеріалів зв'язана з максимально діючими напруженнями.

На основі методу магнітної пам'яті розроблено більш ніж 25 галузевих стандартів і керівних документів, однак його застосування обмежується переважно для вирішення задач напружено-деформованого стану конструкцій.

Таким чином, в сучасному розвитку магнітних методів контролю механічних характеристик сталей можна виділити два основні напрямки [16]:

- 1) пошук нових параметрів контролю та розроблення відповідних методик вимірювання та вимірювальних перетворювачів;
- 2) багатопараметричний (комплексний) контроль зі використанням одночасно двох чи більше магнітних характеристик.

Можливості першого напрямку здебільшого вже реалізовані, а розвиток багатопараметричного контролю стимулюється не тільки ускладненням задач контролю, але й значним розвитком комп'ютерних технологій збору та обробки інформації.

Багатопараметрові методи магнітної структуроскопії пропонувалися, наприклад, в роботах [21, 34, 35]. В [27] показана можливість оцінки міцнісних

характеристик сталі 38ХС за комплексом їх магнітних властивостей. В [36] проведено аналіз взаємозв'язку механічних характеристик і складом хімічних елементів, що суттєво відрізняються по складу сталей при варіаціях температур загартування та відпуску. Отримані регресійні моделі дозволяють за складом основних елементів і температури загартування сталей прогнозувати характер зміни коерцитивної сили  $H_c$ , залишкової намагніченості  $M_r$  (або індукції  $B_r$ ) і релаксаційної намагніченості  $M_{Hr}$ . В [16] показано, що найбільш надійну оцінку міцнісних властивостей сталевих труб дає двохпараметровий контроль з використанням коерцитивної сили і залишкової магнітної індукції (коефіцієнт множинної регресії  $R_{H_c, B_r} = 0.97$ ).

Наведених прикладів достатньо для підтвердження перспективності багатопараметрових методів контролю механічних характеристик сталей.

З технічних засобів багатопараметрового магнітного контролю привертає увагу магнітний мультитестер ММТ-2 [16]. Покладений в основу роботи приладу принцип вимірювання дозволяє визначити відносні значення магнітних властивостей контрольованих об'єктів в широкому діапазоні їх зміни.

### 1.2.2. Акустичний контроль механічних характеристик сталей

Акустичні методи контролю механічних характеристик сталей базуються на встановлених взаємозв'язках між цими характеристиками та акустичними характеристиками металів.

До найважливіших інформативних параметрів акустичних методів контролю механічних характеристик матеріалів відносять [37]:

- швидкість та час поширення ультразвуку;
- коефіцієнт затухань ультразвукових коливань;
- параметри акустичної емісії;
- характеристики взаємодії індентора з об'єктом контролю.



Відомо, що швидкість поширення ультразвуку в металах зв'язана з їх структурою і властивостями [38, 39]. Багато учених вважає, що монотонний характер зміни акустичних характеристик за зміною механічних характеристик може служити основою для організації промислового неруйнівного контролю механічних характеристик металів по швидкості ультразвуку. Цей зв'язок базується на залежності механічних та акустичних властивостей від структурного стану металу [40].

Використання акустичних методів дозволило виявляти місця з пониженою механічною міцністю. Точність вимірювань досягає  $\pm 0.001\%$  при чутливості до  $10^{-7}$ . Так, наприклад, в роботі [41] вказано на можливість контролю твердості та ударної в'язкості за вимірними значеннями швидкості поширення ультразвуку на прикладі сталі 09Г2С.

В зміну швидкості звуку може давати вклад одразу декілька факторів: анізотропія характеристик сталі, в тому числі модулів пружності; деформація феритних та перлітних зерен при прокатці; неоднорідний розподіл домішок і неоднакова густина в різних ділянках сталі.

Лінійний характер кореляційних залежностей між твердістю та швидкістю ультразвуку якісно можна оцінити функціональним зв'язком цих двох величин з пружними властивостями металу. Дійсно [38], швидкість ультразвукових коливань залежить від виразу  $\left(\frac{G}{\rho}\right)^{1/2}$ , де  $G$  – модуль зсуву,  $\rho$  – густина. Більш точний якісний зв'язок між досліджуваними величинами поки не встановлений.

Розроблений також метод [42], що дозволяє виявляти області локальних змін структури та механічних характеристик металу протягнутих виробів з допомогою вимірювання швидкості поверхневих (Релея) і підповерхневих (головних) акустичних хвиль.

Можливість акустичного контролю механічних властивостей металів встановлена наприклад в [43, 44]. Зокрема в [45] зроблена спроба промислового використання акустичного методу для виявлення зон із заниженою механічною

міцністю та визначення числових значень механічних характеристик металу енергообладнання з метою прогнозування його залишкового ресурсу.

В [46] досліджено використання повздовжньо-поверхневих хвиль для виключення впливу шорсткості поверхні на результати акустичних вимірювань при контролі твердості сталі. Ці хвилі не розсіюються на нерівностях поверхні виробу і дозволяє отримувати інформацію про якість металу підповерхневого шару.

Для практичної реалізації контролю механічних характеристик для певних марок сталей розроблений прилад ИСП-12, принцип якого базується на методі автоциркуляції імпульсу [47]. Відомий також акустичний метод для експрес-контролю розширеної номенклатури механічних характеристик конструкційних сталей [48]. Запропонований метод відноситься до методів дослідження внутрішньої будови матеріалу за допомогою ультразвуку. Згідно даного методу виріб поміщають в рідину, при цьому приймають перший і другий пройшовші імпульси повздовжньої хвилі, імпульс поперечної хвилі, що однократно пройшла через матеріал, а також імпульс, що пройшов через рідину за відсутності об'єкту у вимірювальному тракті. За швидкістю поширення пружних хвиль в рідині та об'єкті визначають механічні характеристики матеріалу (модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона та модуль Юнга).

Не дивлячись на відносну простоту реалізації розглянутих методів та наявність відповідної апаратури, визначати значення механічних характеристик матеріалів по виміряним значенням швидкості та часу поширення ультразвукової хвилі внаслідок незначної зміни цих акустичних характеристик із достатньою для практики точністю доволі складно.

Дуже часто на практиці, з метою оцінки переддефектного стану матеріалу та прогнозування розвитку сформованих дефектів, необхідна інформація щодо просторового розподілу механічних характеристик матеріалу. Необхідну для діагностики виробу інформацію про просторовий розподіл механічних характеристик матеріалу можна отримати за допомогою ультразвукової комп'ютерної томографії [49]. За допомогою технології ультразвукової

томографії можна визначати просторовий розподіл механічних характеристик матеріалу, в тому числі параметрів НДС, міцнісних (твердість, модуль Юнга та ін.), технологічних та інших характеристик.

Для визначення міцнісних характеристик конструкційних матеріалів цікавими є роботи по використанню явища акустичної емісії (АЕ), тобто випромінювання матеріалом пружних хвиль, яке викликане динамічною локальною перебудовою його внутрішньої структури [50].

Частотний спектр АЕ розподілений від області звукових частот до десятків та сотень мегагерц. Відомо, що пластичні та міцнісні характеристики матеріалу визначаються наявністю в ньому дислокацій. В залежності від напрямку обриву атомної площини дислокаціям приписують додатній або від'ємний знак. Їх взаємодія обумовлюється пружними напруженнями, викликаними кожною дислокацією. Прискорений рух, відрив чи анігіляція дислокацій викликають акустичні імпульси. Акустична емісія супроводжує весь процес деформування матеріалу від стадії руху і виходу на поверхню дислокацій до повного руйнування конструкції.

В роботі [51] встановлено, що поява неперервних сигналів АЕ свідчить про початок пластичного розтікання металів. Досліджені зразки виготовлені із сталей 30ХГНСА, Ст. 3, 12Х18Н10Т і титану ВТ1-0. Акустична емісія реєструвалась вимірювачем потужності слабких сигналів ИМ-1. Моментом появи АЕ вважався момент, коли сигнал, що реєструвався перевищував рівень шумів на величину роздільної здатності приладу. Дослідження показали, що застосування акусто-емісійного методу в якості індикатора залишкової деформації дозволяє визначати границю пружності досліджуваних матеріалів з допуском 0.0005%.

### 1.2.3. Термоелектричний контроль механічних характеристик матеріалів

Термоелектричний метод являється одним із основних неруйнівних методів ідентифікації сталей і металів по марках [52]. Висока чутливість до

змін хімічного і фазового складів [53], відносна простота та висока швидкість вимірювання забезпечує широке застосування цього методу для розбракування сталей по маркам [54], для експрес-аналізу сталі безпосередньо у ході плавлення і в злитках, для визначення товщини гальванічних покриттів, вимірювання глибини загартованого шару, дослідження процесів втоми металу та визначення їх механічних характеристик.

Джерелом інформації про фактичний фізичний стан матеріалу при термоелектричному контролі являється термо-ЕРС, яка виникає в колі, що складається із пари електродів (гарячого та холодного) та об'єкту контролю. Обробка інформації може проводитися як за прямою, так і за диференціальною схемою.

Реєстрація результатів контролю можлива трьома способами: за індикацією нульового показу, за кутом відхилення стрілки індикаторного приладу, за зміною знака термо-ЕРС.

Термоелектричний метод базується на ефектах, які пов'язані з виникненням в металах термо-ЕРС. На сьогодні відомо три ефекти, обумовлених явищем термоелектрики [55]: 1) ефект Томпсона; 2) ефект Зеєбека; 3) ефект Пельтьє.

Значення термо-ЕРС і твердості залежать від вмісту вуглецю в твердому розчині. За вмісту вуглецю в цементованому шарі нижче евтектоїдного спостерігається однозначна залежність від нього значень термо-ЕРС, а за рівного чи більшого вмісту – такої залежності немає. Так, в роботі [56] досліджувалась залежність величини термо-ЕРС від різних легуючих компонентів, що входять у склад сталей. Встановлено, що термо-ЕРС більш чутлива до вмісту хрому і дещо менше до вмісту вуглецю. Це означає, що вироби із сталей, що відрізняються між собою за вмістом вуглецю, можуть бути надійно розсортовані.

Для вимірювання величини термо-ЕРС найбільшого практичного застосування знайшли прилади ТМС-МП [52], ТСП-16, ТЭП-ЮК і ПКММ-2.

#### 1.2.4. Вихрострумний метод контролю

Даний метод базується на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля вихрових струмів, що наводяться збуджуючою котушкою в електропровідному об'єкті контролю даним полем. В якості джерела електромагнітного поля найчастіше використовується одна або декілька індуктивних котушок (вихрострумний перетворювач - ВСП). Синусоїдальний або імпульсний струм, що наводяться в котушках, створює електромагнітне поле, яке створює вихрові струми в досліджуваному об'єкті. Реєструючи напругу на котушках (трансформаторні ВСП) або їх опір (параметричні ВСП), отримують інформацію щодо властивостей об'єкту і положення ВСП відносно нього. Перевагою вихрострумного методу є можливість проведення контролю без контакту перетворювача з досліджуваним об'єктом.

Для феромагнітних матеріалів на вихідний сигнал перетворювача впливають такі параметри як питомий електричний опір, магнітна проникність та розміри об'єкту контролю [57]. Отримання інформації по двох перших параметрах окремо є важко вирішуваною задачею [58]. Тому застосування вихрострумного контролю в задачах структуроскопії обмежується переважно немагнітними матеріалами.

Таким чином аналіз відомих методів та засобів контролю показав, що сучасні методи неруйнівного контролю (магнітний, акустичний, термоелектричний, вихрострумний) при їх індивідуальному застосуванні не дозволяють достатньо точно визначати механічні характеристики сталей. Тому виникає необхідність в розробленні комплексних підходів, які б використовували інформативні параметри, що відносяться до різних типів фізичних полів. Залежність зміни механічних характеристик сталей від мікроструктурних змін в металі зумовлює доцільність використання структурно чутливих параметрів контролю (див. рис.1.4). До найбільш перспективних інформативних параметрів контролю механічних характеристик слід віднести

питомий електричний опір, який є нормативною фізичною характеристикою і вказується в стандартах на сталі. Відомо [59], що більшість сталевих виробів набувають необхідний комплекс фізико-механічних характеристик у результаті термічного оброблення. Термічне оброблення зумовлює встановлення певної структури металу та очікуваних механічних характеристик. Поряд з механічними характеристиками зазнають змін всі структурно чутливі параметри, зокрема питомий електричний опір. Проблема вимірювання питомого електричного опору на реальних об'єктах є головною перешкодою для застосування цього параметра в практиці неруйнівного контролю. В роботі [18] було зроблено спробу встановити взаємозв'язки між механічними характеристиками сталей з їх питомим електричним опором. Зокрема розроблено підхід до визначення границі плинності та границі міцності сталей трубопроводів за значеннями їх питомого електричного опору, теплопровідності та твердості [17]. Проте автори зіткнулися з проблемою вимірювання малих значень питомого опору феромагнітних сталей, тому їм довелось відкинути даний параметр з переліку обраних.

Тому далі буде розглянуто методи і підходи до визначення питомого опору сталей з метою вибору найбільш перспективного з точки зору його застосування в реальних умовах експлуатації сталевих конструкцій.

#### 1.2.5. Методи вимірювання питомого електричного опору сталей

Вимірювання питомого електричного опору металів та сталей на рівні кількох сотень нОм·м в реальних умовах з необхідною точністю викликає значні труднощі [60]. Тому проаналізуємо відомі методи вимірювання питомого опору матеріалів і виділимо з них найбільш перспективні, які можна застосувати для контролю на феромагнітних сталях.

Методи вимірювання питомого електричного опору матеріалів поділяють на контактні та безконтактні (рис.1.8) - [61]:

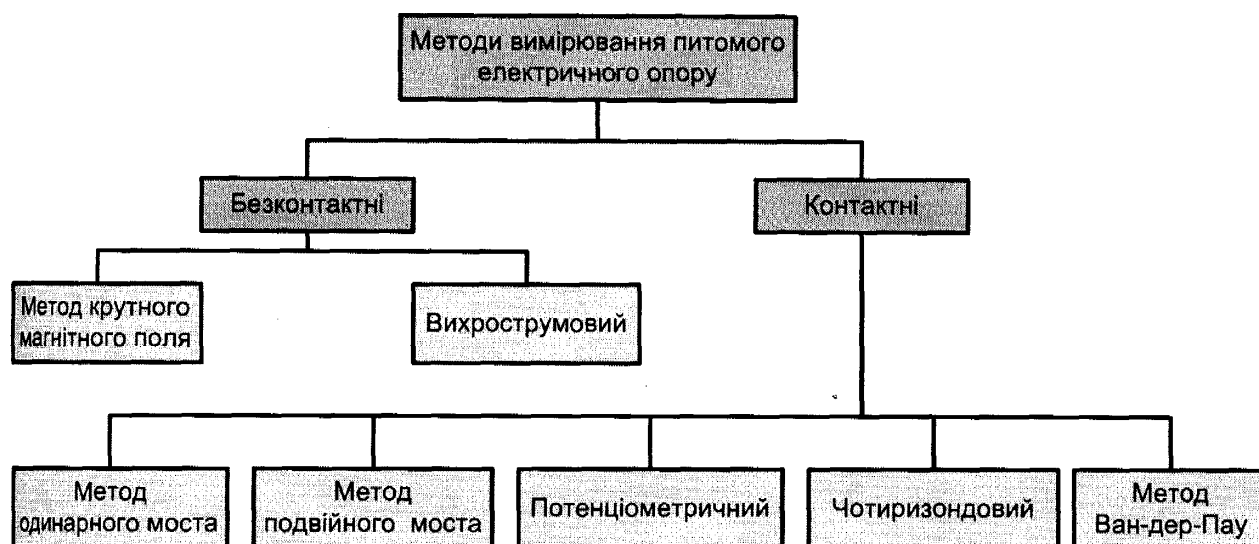


Рис.1.8. Методи вимірювання питомого електричного опору матеріалів

В методі крутного магнітного поля електропровідність (величина обернена до питомого опору) визначають по величині діючого на нього моменту сил, що вимірюється по куту закручування підвісу. Точність даного методу становить 1%, однак для її досягнення вводять поправки на форму та самоіндукцію зразка, зміну магнітного стану феромагнетиків. На даний час цей метод широкого застосування не знайшов, тим паче, що застосувати його на реальних конструкціях неможливо.

Електромагнітний (вихрострумівий) метод базується на аналізі зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрострумівих струмів, що наводяться збуджуючою котушкою в електропровідному об'єкті контролю. ЕРС (або опір) вихрострумівого перетворювача залежить від багатьох параметрів об'єкту контролю, тобто інформація є багатопараметричною. Для феромагнітних матеріалів і виробів величина вихрових струмів залежить від трьох параметрів [57]: електропровідності  $\sigma$ , розмірів виробу та магнітної проникності  $\mu$ .

Контроль електропровідності вихрострумівим методом здійснюється, як правило, з допомогою накладного ВСП [62] - (рис.1.9).

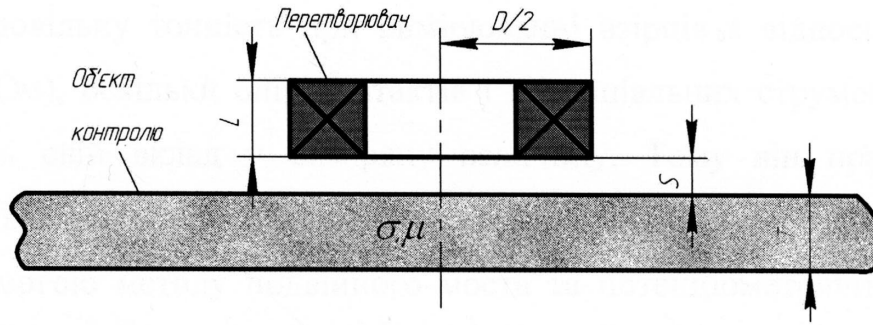


Рис.1.9. Контроль електропровідності вихрострумовим методом

Проте даному методу притаманні суттєві недоліки. З однієї сторони, ВСП дає змогу здійснити багатопараметричний контроль, проте, з іншої сторони, необхідні спеціальні прийоми для розділення інформації про окремі параметри об'єкту. Тому при контролі вихрострумовим методом електропровідності, вплив інших параметрів на сигнал ВСП стає на заваді, тому цей вплив необхідно зменшити.

На даний час існує кілька неоднозначних підходів щодо розділення інформації про окремі параметри контролю феромагнітних об'єктів, завдяки яким є змога виділити інформацію, що стосується власне питомої електропровідності [63-65]. Тому вихрострумовий контроль електропровідності обмежується переважно немагнітними матеріалами. Крім того, якщо досліджуваний матеріал не є гомогенним по товщині, тобто його властивості є різними по об'ємі об'єкту, то в такому разі можна отримати недостовірні значення питомого електричного опору. Це пояснюється тим, що глибина проникнення вихрових струмів є досить малою (до 1мм), тому отримана інформація стосуватиметься тільки підповерхневого шару об'єкту контролю. Така ситуація може виникнути коли, наприклад, поверхня сталеві конструкції знаходиться в стані наклепу.

Тепер розглянемо контактні методи вимірювання питомого електричного опору [61]. Мостові методи вимірювання електричного опору широко використовуються як для вимірювання малих опорів, так і для вимірювання великих опорів, які відрізняються декількома порядками. Розрізняють простий (або одинарний) та подвійний електричні мости. Метод одинарного моста



забезпечує задовільну точність при вимірюванні взірців з відносно великим опором ( $>10$  Ом), оскільки опір контактів і потенціальних струмопідводів до взірця вносять свій вклад у виміряну величину. Тому він практично не використовується для вимірювання питомого опору сталей.

За допомогою методу подвійного моста та потенціометричного методу можна з високою точністю вимірювати малі значення опору (від  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $1$  Ом). Дані методи використовують, як правило, для визначення фазового складу металічних сплавів, зразки яких володіють низьким опором і відповідно невелика його зміна в процесі різних видів обробки.

Чотиризондовий (чотириконтатний) метод вимірювання питомого опору матеріалу полягає в наступному [66]. До об'єкта контролю приєднують чотири зонди-електроди вимірювальної схеми так, як це показано на рис.1.10.

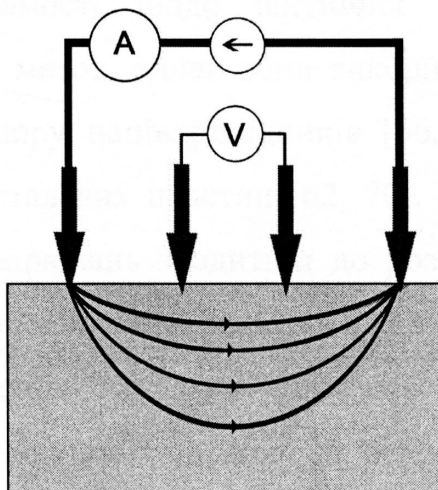


Рис.1.10. Чотиризондовий метод вимірювання питомого електричного опору

З допомогою джерела постійного струму в матеріалі протікає струм  $I$  між двома крайніми контактами, який вимірюється з допомогою амперметра. Одночасно, за допомогою вольтметра вимірюють напругу  $U$  на ділянці досліджуваного матеріалу, що знаходиться між двома внутрішніми контактами.

При цьому величину питомого електричного опору визначають за формулою:

$$\rho = \frac{U \cdot S}{I \cdot l}, \quad (1.1)$$

де  $U$  - виміряна напруга між двома внутрішніми електродами;

$S$  - площа поперечного січення контрольованого матеріалу;

$I$  - сила струму, який протікає в матеріалі;

$l$  - віддаль між двома внутрішніми контактами.

Слід зазначити, що вираз для розрахунку питомого електричного опору (1.1) можна застосовувати тільки в тому випадку, якщо довжина об'єкта значно більша поперечного перерізу. В такому разі постійний струм розтікається по всьому об'єму взірця, як в ширину, так і в глибину. В іншому разі необхідно вводити функцію поправки, яка залежить від форми, розмірів об'єкта контролю та взаємного розміщення зондів вимірювальної системи [67].

Вдалось знайти відомості щодо існуючих технічних засобів, які реалізують чотиризондовий метод, однак вони використовуються здебільшого для контролю питомого опору напівпровідників [66, 68], тонких металевих покриттів [69] або тонких металевих пластин [62, 70]. При цьому математичне оброблення результатів вимірювань зводиться до розгляду об'єкту контролю малої товщини, або напівнескінчених розмірів [71]. Відповідно геометричні функції поправок для цих крайніх випадків описуються різними залежностями, що обмежує застосування існуючих засобів на різних типорозмірах об'єкту контролю.

Метод Ван-дер-Пау [68] є однією з модифікацій чотиризондового методу і дає змогу вимірювати питомий електричний опір зразків з довільною геометричною формою, проте його доволі складно реалізувати в технічному плані: вимагає індивідуального розміщення зондів у залежності від форми зразка, що значно збільшує час контролю.

Крім того, при огляді контактних методів не враховувались значення опору провідників та перехідного опору контактів, які повинні бути якомога меншими.

### 1.3. Вибір та обґрунтування напрямку досліджень

Аналіз об'єкта контролю показав, що для забезпечення безпечної експлуатації сталевих конструкцій тривалої експлуатації, що використовуються в базових галузях промисловості та надання підстав до продовження їх ресурсу, необхідно проводити контроль в основному показників міцності характеристик (границі плинності та границі міцності), а також показників опору крихкому руйнуванню (здебільшого ударної в'язкості), які зазнають деградації в процесі експлуатації.

Якщо можливість неруйнівного контролю міцнісних та пластичних властивостей металу зазвичай не викликає сумнівів, то з ударною в'язкістю питання ставиться по-іншому – висловлюються не тільки сумніви про можливість його використання, але й категоричні заперечення [6]. Головна причина полягає в тому, що величина ударної в'язкості сильно залежить від стану границь зерен. Атоми деяких хімічних елементів та неметалічні включення, що виділяються на границях, можуть призвести до послаблення цих границь і до значної крихкості металу. В той же час для інших фізико-механічних властивостей (міцнісних, магнітних, електричних) подібна залежність слабка і різниця між границями з домішками, що знаходяться на ній і без них, скоріше знаходяться через пластичність матеріалу.

Аналіз відомих методів та засобів контролю показав, що:

1) Сучасні методи неруйнівного контролю (магнітний, акустичний, термоелектричний, вихрострумний) при їх індивідуальному застосуванні не дозволяють достатньо точно визначати механічні характеристики сталей;

2) Не існує структурованої теоретичної бази, яка б дала змогу аналітично встановити взаємозв'язки механічних характеристик з відомими інформативними параметрами;

3) Існуючі кореляційні залежності між механічними характеристиками та інформативними параметрами переважно встановлено експериментальним шляхом і носять емпіричний характер;

4) Застосування того чи іншого методу контролю механічних характеристик обмежується, як правило, певними марками чи групами міцності сталей;

5) Існують значні труднощі щодо реалізації контролю питомого електричного опору феромагнітних сталей на реальних об'єктах;

6) До найбільш перспективних методів контролю питомого електричного опору сталей слід віднести вихрострумний та електроконтактний чотиризондовий. Перший метод обмежується переважно немагнітними матеріалами, а другий ускладнений, в першу чергу, впливом геометричної форми та розмірів об'єкту досліджень на результати контролю;

7) В останні роки сучасний розвиток неруйнівних методів визначення механічних характеристик сталей спрямований на розробку комплексних методів, які передбачають врахування декількох інформативних параметрів одночасно, що відносяться до різних типів полів.

Тому метою роботи є удосконалення комплексного методу контролю механічних характеристик сталей за новими інформативними параметрами, зокрема питомим електричним опором як однієї з основних структурно чутливих характеристик, що регламентується в нормативній документації на сталі. До переліку інформативних параметрів доцільно включити також твердість, яка характеризується стійким кореляційним зв'язком з механічними характеристиками сталей.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

Проведений в розділі 1 аналіз показав, що жоден із відомих методів при їх індивідуальному застосуванні не дає змогу достовірно визначати механічні характеристики, оскільки вони ґрунтуються на тісних кореляційних залежностях між вибраним інформативним параметром і механічними характеристиками тільки для окремої марки сталі або груп сталей, і тим самим можуть не поширюватися на інший асортимент сталених виробів. Багато параметричні магнітні методи поширюються тільки на магнітні матеріали. Тому, з даної точки зору, перспективними та універсальними видаються комплексні методи [18]. Комплексні підходи дають змогу підійти до проблеми визначення механічних характеристик більш ширше за рахунок того, що інший досліджуваний параметр перекриває певні обмеження попереднього, тим самим збільшуючи достовірність визначення механічних характеристик. При цьому використовуються інформативні параметри, що належать до різних типів фізичних полів (електричний, магнітний тепловий тощо).

З метою підвищення достовірності визначення механічних характеристик сталей, необхідно розробити нові комплексні методи за рахунок збільшення інформативності контролю параметрів, які досить важко (або неможливо) було виміряти в польових умовах, але які тісно можуть бути пов'язані з механічними характеристиками сталей. Основним таким параметром являється питомий електричний опір.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести комплекс теоретичних досліджень щодо обґрунтування вибору інформативних параметрів контролю (зокрема питомого електричного опору), дослідивши їх взаємозв'язок із механічними характеристиками сталей та можливість вимірювання в польових умовах.

Відомий комплексний метод для визначення фізико-механічних характеристик сталей [17], який полягає у вимірюванні твердості та параметру, який характеризує теплопровідність та їх використання для розрахунку значень границі плинності/міцності за допомогою алгоритмів штучних нейронних мереж. Було також розроблено прилад ФМХ-1 для реалізації запропонованого методу [72].

Проте, ні у вказаних, ні в інших роботах не було приділено належної уваги дослідженню залежності механічних характеристик від питомого електричного опору – наприклад, в роботі [18] вказано на структурну чутливість цього параметра без ґрунтового підтвердження цього факту.

Тому необхідно проаналізувати зв'язок питомого електричного опору зі механічними характеристиками сталей з точки зору структурної залежності обраного комплексу фізико-механічних характеристик.

## 2.1. Теоретичні дослідження методу

### 2.1.1. Дослідження взаємозв'язку між структурним станом сталей та їх фізико-механічними характеристиками

Для проведення теоретичних досліджень щодо оцінювання взаємозв'язку структури сталі з їх ФМХ було обрано такі структурно чутливі параметри як коефіцієнт теплопровідності та питомий електричний опір [73].

Враховуючи структурну чутливість коефіцієнта теплопровідності та питомого електричного опору, було досліджено яким чином вказані параметри в комплексі залежать від типу структури сталей. Факт взаємозв'язку електропровідності та теплопровідності чистих металів відомий давно і ліг в основу закону Відемана-Франца [74]. Для визначення мікроструктури вуглецевих сталей було вирішено перевірити даний закон, використовуючи довідкові дані по сталям з різним типом структури.

Відеман Г. і Франц Р. на основі експериментальних даних встановили, що для всіх металів відношення теплопровідності  $\lambda$  і електричної провідності  $\sigma$  при постійній температурі однакове [75]:

$$\frac{\lambda}{\sigma} = const, \quad (2.1)$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності,  $\frac{Вт \cdot м}{К}$ ;

$\sigma$  - питома електропровідність,  $\frac{См}{м}$ .

Лоренц Л. показав, що співвідношення  $\frac{\lambda}{\sigma}$  змінюється прямо пропорційно абсолютній температурі  $T$ :

$$\frac{\lambda}{\sigma} = L \cdot T, \quad (2.2)$$

де  $L$  – стала, днакова для всіх металів, називається числом Лоренца.

Взаємозв'язок електричної провідності та теплопровідності пояснюється тим, що обидві ці властивості металів зумовлені, в основному, рухом електронів.

Закон Відемана-Франца виконується тільки для чистих металів. Враховуючи те, що сталь є складною сполукою або механічною сумішшю заліза, вуглецю та легуючих елементів, можна припустити, що відношення (2.1) не буде постійним для різних марок сталей, проте буде близьким по значеннях для сталей в межах одного типу структури.

Для перевірки вище зазначеної теоретичної ідеї, було використано відомості щодо вибраних характеристик для 142 іноземних марок сталей, які були вибрані з різними типами структур (додаток А):

- 1) аустенітні сталі (вибрано 88 марок сталей);
- 2) феритні сталі (вибрано 12 марок сталей);
- 3) дуплексні сталі (вибрано 26 марок сталей);
- 4) мартенситні сталі (вибрано 16 марок сталей).

Наведемо діапазони зміни вибраних параметрів для досліджуваних марок сталей:

- |                               |                  |
|-------------------------------|------------------|
| 1) границя міцності –         | 400-2200 МПа;    |
| 2) границя плинності –        | 145-1800 МПа;    |
| 3) твердість –                | 140-332 НВ;      |
| 4) теплопровідність –         | 9.1-32.3 Вт/м·К; |
| 5) питомий електричний опір – | 500-1450 нОм·м.  |

Питомий електричний опір та питома електропровідність зв'язані між собою обернено пропорційною залежністю:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (2.3)$$

Підставляючи вираз (2.3) в (2.1) і враховуючи припущення про те, що відношення (2.1) не буде постійним для сталей в межах різних типів структур, для кожної мікроструктурної групи для всіх марок сталей було розраховано коефіцієнт  $K_i$ :

$$K_i = \rho_i \cdot \lambda_i, \quad (2.4)$$

та розраховано середнє значення  $K_{сер}$  для 4-х типів структур:

$$K_{сер} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}, \left[ \frac{Вт \cdot Ом}{К} \right] \quad (2.5)$$

де  $\rho_i$  - питомий електричний опір  $i$ -ї марки сталі, Ом·м;

$\lambda_i$  - коефіцієнт теплопровідності  $i$ -ї марки сталі,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ ;

$n$  – кількість марок сталей в структурній групі.

Результати розрахунку усередненого коефіцієнта  $K_{сер}$  за формулою (2.5) наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

**Результати розрахунку коефіцієнта  $K_{сер}$**

№	Структура сталей	Значення коефіцієнта $K_{сер} \cdot 10^{-6}$	Діапазон значень коефіцієнта $K_i \cdot 10^{-6}$
1	Аустенітна	12.05	9.9-13.6
2	Дуплексна	12.55	11.8-13.6
3	Мартенситна	15.45	13.7-18.0
4	Феритна	15.72	14.0-17.7



Як видно з табл.2.1, значення коефіцієнта  $K_{сер}$  відрізняється для різних типів структури сталей. Причому найбільше абсолютне значення даного коефіцієнта відповідає феритним сталям, а найменше – аустенітним. Проте чітко ідентифікувати приналежність певної марки сталі до тієї чи іншої структури можна тільки для двох груп сталей. До першої групи належать аустенітні та дуплексні сталі, для другої – мартенситні та феритні сталі. Для того, щоб згідно даного методу можна було визначити приналежність тієї чи іншої марки сталі до конкретної мікроструктури, необхідно провести додаткові дослідження.

З метою встановлення взаємозв'язку між механічними характеристиками та вибраними параметрами було проведено кореляційний аналіз досліджуваних параметрів сталей в середовищі *MATLAB 2006b*.

Значення коефіцієнтів кореляції між досліджуваними параметрами (границею міцності  $\sigma_B$ ; границею плинності  $\sigma_T$ ; твердістю за шкалою Брінеля  $HB$ ; теплопровідністю  $\lambda$ ; питомим електричним опором  $\rho$ ), отримані з врахуванням всіх вибраних сталей, подані в табл.2.2.

Таблиця 2.2

#### Матриця коефіцієнтів кореляції досліджуваних параметрів всіх сталей

	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\rho$	$\lambda$	$HB$
$\sigma_B$	1	0.936	0.079	-0.038	0.569
$\sigma_T$		1	0.058	0.134	0.786
$\rho$			1	-0.625	-0.092
$\lambda$				1	-0.074
$HB$					1

Значення коефіцієнтів кореляції, отримані в межах окремих типів структур, подані в табл.2.3.

Проаналізуємо одержані матриці коефіцієнтів кореляцій (див. табл.2.2, 2.3):

1) високі значення коефіцієнтів кореляції між границею плинності, границею міцності і твердістю підтверджують існуючі відомості [76] щодо стійкої прямо пропорційної залежності між цими параметрами;

**Матриця коефіцієнтів кореляції досліджуваних параметрів для окремих типів структур**

<i>Аустенітна структура</i>					
	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\rho$	$\lambda$	<i>HV</i>
$\sigma_B$	1	0,911	0,375	-0,181	0,805
$\sigma_T$		1	0,29	-0,124	0,337
$\rho$			1	-0,515	0,108
$\lambda$				1	-0,272
<i>HV</i>					1
<i>Дуплексна структура</i>					
	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\rho$	$\lambda$	<i>HV</i>
$\sigma_B$	1	0,994	0,729	-0,685	0,987
$\sigma_T$		1	0,759	-0,682	0,997
$\rho$			1	-0,344	0,945
$\lambda$				1	-
<i>HV</i>					1
<i>Феритна структура</i>					
	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\rho$	$\lambda$	<i>HV</i>
$\sigma_B$	1	0,967	0,825	-0,740	0,761
$\sigma_T$		1	0,803	-0,694	0,723
$\rho$			1	-0,919	0,868
$\lambda$				1	-0,907
<i>HV</i>					1
<i>Мартенситна структура</i>					
	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\rho$	$\lambda$	<i>HV</i>
$\sigma_B$	1	0,982	0,212	0,02	0,918
$\sigma_T$		1	0,233	0,024	0,884
$\rho$			1	-0,463	0,521
$\lambda$				1	-0,853
<i>HV</i>					1

2) коефіцієнти кореляції досліджуваних параметрів для окремих типів структур (за винятком мартенситних сталей) в цілому виявилися вищими за коефіцієнти кореляції при проведенні аналізу для всіх марок сталей разом;

3) знак “-” в табл.2.2, 2.3 свідчить про те, що залежність коефіцієнта теплопровідності від границі міцності, границі плинності, твердості та питомого електричного опору є обернено пропорційною;

4) найкраща кореляція питомого електричного опору з границею міцності/плинності та твердістю спостерігається для феритних та дуплексних (феритно-перлітних) сталей (див. табл. 2.3);

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

В додатку Б подано графічні залежності границі плинності від комплексу досліджуваних параметрів (рис.Б.1-Б.12).

Враховуючи складний характер залежностей між вхідними параметрами та механічними характеристиками, для апроксимації границі плинності як нелінійної багатопараметричної функції комплексу параметрів твердості, питомого електричного опору та коефіцієнта теплопровідності, пропонується використовувати алгоритми штучних нейронних мереж [77, 78] в межах кожної структурної групи.

Встановлення універсальних апроксимуючих властивостей штучних нейронних мереж (ШНМ) стало досить важливим етапом у становленні загальної теорії та стимулювало дослідження в галузі штучного інтелекту [79, 80]. Багатьма дослідниками було встановлено, що нейронна мережа з одним прихованим й одним вихідним шаром нейронів здатна апроксимувати з будь-якою наперед заданою точністю на компактній множині будь-яку неперервну функцію [81].

Алгоритми нейронних мереж передбачають процедуру так званого “навчання” і тестування правильності навчання, для чого з усіх марок сталей було сформовано три окремих набори тренувальних та тестових даних:

- 1-й набір включає в себе аустенітні та дуплексні сталі, що входять до першої структурної групи (кількість марок для тренування мережі – 90, для тестування - 5);
- 2-й набір включає в себе феритні та мартенситні сталі, що входять до другої структурної групи (кількість марок для тренування мережі – 37, для тестування - 3);

- 3-й набір включає в себе сталі всіх типів структур (кількість марок для тренування мережі – 127, для тестування - 8).

Нейронна мережа заданої будови тренувалась для розв'язання задачі апроксимації границі плинності як функції двох інформативних параметрів - питомого електричного опору та коефіцієнта теплопровідності.

Необхідно зазначити, що згідно із прийнятою практикою [80], тестування нейронних мереж виконують на даних, що не використовувались під час навчання (невідомі для нейронної мережі) – таким чином забезпечується об'єктивність судження про здатність мережі до апроксимації необхідної функції та відповідає умовам контролю.

Підготовка даних (як вхідних, так і вихідних) здійснювалась за стандартною процедурою нормування для одержання значень параметрів у межах (0 1). Як тренувальний алгоритм в усіх мережах використовувався алгоритм Левенберга-Марквардта [79], який використовується для тренування невеликих мереж і характеризується швидким сходженням.

Вибір архітектури нейронних мереж, підготовки даних, вибору тестових наборів та тренувальних алгоритмів здійснюється на базі досвіду дослідника [77] і залежить від природи та складності поставленої задачі, а також об'єму наявних статистичних даних.

Шляхом проведення тренувань та тестувань нейронних мереж різних архітектур, найкраще здатною до апроксимації виявилася ШНМ з архітектурою  $20 \times 10 \times 1$ . Архітектура ( $20 \times 10 \times 1$ ) означає, що в першому прихованому шарі міститься 20 нейронів, у другому – 10, у вихідному – 1.

Результати тестування натренованих мереж для 3-х наборів даних наведено у табл. 2.4.

За результатами, наведеними у табл. 2.4, можемо зробити такі висновки:

- 1) визначення механічних характеристик сталей у межах груп із однаковою або схожою структурами дозволяє в 2-3 рази підвищити точність визначення цих характеристик, що може вказувати на тісний зв'язок між структурним станом сталей та їх механічними характеристиками;

## Результати тестування нейронної мережі

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

2) використання штучних нейронних мереж дозволяє встановлювати взаємозв'язки між інформативними параметрами (питомий електричний опір) та досліджуваними характеристиками (границя плинності) за невисоких значень коефіцієнтів кореляції між ними;

3) отримані результати у ході першого етапу досліджень попередньо підтверджують вибір питомого електричного опору як інформативного параметра контролю механічних характеристик сталей.

На описаний вище спосіб отримано патент України на винахід (додаток В). Проведені на першому етапі дослідження на довідкових даних дали змогу встановити взаємозв'язок ФМХ сталей з їх структурою [82]. В наступному підрозділі зроблено спробу пояснити зв'язок питомого опору як інформативного параметра механічних характеристик сталей.

### 2.1.2. Пояснення зв'язку питомого електричного опору сталей з їх механічними характеристиками

Попередні теоретичні дослідження показали, що взаємозв'язок між питомим електричним опором та механічними характеристиками необхідно розглядати з точки зору їх структурної чутливості.

Проаналізуємо зв'язок мікроструктурного стану та механічних характеристик конструкційних сталей на прикладі аналізу залежності границі плинності  $\sigma_T$  від структури сталей. Границя плинності залежить від структури і, перш за все, від розмірів зерен фериту.

Так, границя плинності металу, який складається з однорідних зерен, описується рівнянням Петча-Холла-Лоу [83]:

$$\sigma_T = \sigma_i + K_y d_\alpha^{-1/2},$$

де  $\sigma_o$  - напруження тертя (опір решітки твердого розчину руху дислокацій);

$K_y$  - коефіцієнт, що визначається енергією взаємодії дислокацій з межами зерен (майже однаковий для різних сталей);

$d_\alpha$  - середній діаметр зерна.

Для даного рівняння справедливе твердження: якщо в об'ємі зерна структура незмінна, то міцність зростає при зменшенні розміру зерна. З іншого боку, відмінність границь плинності вуглецевої та низьколегованої сталей, що володіють різною структурою, обумовлена, головним чином напруженням тертя  $\sigma_o$ .

Виникнення більш високих напружень пояснюється наявністю кремнію і марганцю в розчині. Введення 1% кожного із цих елементів підвищує напруження тертя заліза на 84 і 32 МПа відповідно [84].

Механічні характеристики, такі як границя міцності та границя плинності найбільш поширених маловуглецевих сталей з ферито-перлітною (дулексною) структурою, можна визначити за розміром зерна та кількістю перліту. При введенні різних легуючих елементів змінюються механічні властивості металів.

Кремній зміцнює розчин, але збільшує розмір зерна фериту. Марганець підвищує границю плинності за рахунок зміцнення твердого розчину, подрібнення кількості перліту в мікроструктурі.

Властивості сталі залежать також від кількості, дисперсності розподілу карбідів, що змінюються в широких межах залежно від режимів термооброблення, тривалості експлуатації та ін. Перехід легуючих елементів з твердого розчину в карбіди, коагуляція карбідів і зосередження їх по границях зерен, а також зміна тонкої структури обумовлюють зміну механічних характеристик [6].

Таким чином, структурні складові та параметри, які визначають тип структури (феритна, дуплексна, аустенітна, мартенситна), відповідно визначають величину напруження тертя  $\sigma_0$ , значення якого є приблизно однаковим в межах однотипних структур. Це пояснює те, що найбільш тісні кореляційні зв'язки між механічними та фізичними характеристиками існують тільки в межах однотипних структур, в яких фазовий склад і тип структури однаковий, а змінюються лише кількісні чи розмірні співвідношення структурних складових [85].

Тепер розглянемо вплив структури та зовнішніх чинників на питомий електричний опір сталей.

Давно відомо, що в залежності від величини кристалічних зерен змінюються фізичні властивості металу, зокрема електричні. Детально це було розглянуто Ф. Томпсоном на початку 20 століття. Вчений встановив залежність питомого електричного опору  $\rho$  від кількості кристалічних зерен в  $1\text{см}^3$  для заліза. В 1923 р. Штейнберг, досліджуючи тонкі шари заліза і порівнюючи їх електропровідність з провідністю суцільних металів, дійшов висновку, що питомий опір заліза зростає із зменшенням величини зерен. Подальші дослідження багатьох науковців переконливо показали, що характер кристалічної будови впливає на величину питомого опору.

На рис.2.1 зображено просту мікроскопічну модель протікання струму через метал, яка дає змогу зрозуміти природу питомого електричного опору та його залежність від структурного стану матеріалу [66].

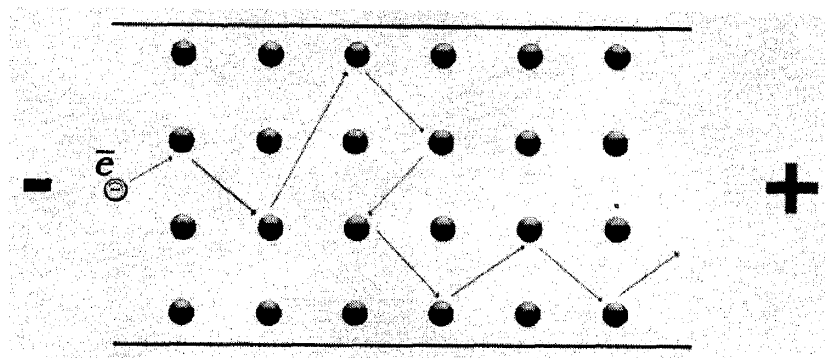


Рис. 2.1. Модель протікання струму в металі під дією прикладеної напруги

Під дією зовнішнього електричного поля напруженістю  $E$  вільні електрони крім теплового руху набувають компоненту дрейфової швидкості. В ізотропному металі напрям густини струму  $j$  співпадає зі напрямом зовнішнього поля. В цьому випадку електропровідність  $\sigma$  являється скалярною величиною і визначається за формулою:

$$j = \sigma \cdot E \text{ [A/m}^2\text{]}.$$

Взаємозв'язок між електропровідністю та питомим електричним опором виражається співвідношенням (2.3).

Зазначимо, що величини  $j$  та  $E$  є векторними, а  $\rho$  - скалярна.

Для більшості металів та сплавів  $\sigma$ , а відповідно і  $\rho$  - сталі величини. Якщо значення  $\sigma$  різне для різних напрямків вектора  $E$ , то матеріал називають анізотропними. Анізотропія металів та сплавів має місце також після різних видів фізичного впливу на матеріал (обробки, деформації, навантажень, зміни температури тощо). В цьому випадку провідник має нелінійну залежність  $j(E)$ .

Під час свого руху потік електронів зазнає опору, що зумовлений флуктуаціями теплових коливань атомів в решітці та її недосконаlostями, які намагаються погасити швидкість електрона, таким чином зменшуючи довжину пробігу останнього (див. рис.2.1).



Для різних металів величина  $\rho$ , в основному, і визначається довжиною вільного пробігу електронів. Розглянемо фактори, що впливають на довжину вільного пробігу [86]. Насамперед, значний вплив має температура провідника, оскільки з її підвищенням збільшуються коливання частин у вузлах кристалічної решітки, ймовірність зіткнення останніх з електронами збільшується, що призводить до зменшення рухливості носіїв і відповідно до збільшення  $\rho$  [87].

Наявність домішок в металах спотворюють кристалічну решітку і призводять до збільшення питомого опору. Атоми домішок, вакансії, дислокації, як правило, мають ефективний електричний заряд, що відрізняється від основних атомів металу, тому вони служать джерелом розсіяння електронів.

Згідно зі правилом Маттісена-Флемінга, питомий електричний опір матеріалу можна представити у вигляді [87]:

$$\rho = \rho_{\text{реш}}(T) + \rho_{\text{деф}} + \rho_{\text{дом}},$$

де  $\rho_{\text{реш}}(T)$  - опір, що залежить від температури металу з ідеальною структурою;

$\rho_{\text{деф}}$  - опір, зумовлений дефектами;

$\rho_{\text{дом}}$  - вклад в опір домішок.

Зрозуміло, що питомий опір конструкційних сталей більший за питомий опір заліза, оскільки сталь є сплавом заліза, вуглецю та легуючих елементів.

Значний вклад у величину питомого електричного опору сплавів вносять також міжфазні границі та області концентраційної неоднорідності. Загальні закономірності зміни електричних властивостей в залежності від структурного стану і хімічного складу сплавів встановлені Курнаковим Н.С. у вигляді діаграм будова-властивість [87].

Більшість сталевих виробів набувають необхідний комплекс фізико-механічних характеристик у результаті термічної обробки, яка включає в себе найбільш розповсюджені операції – загартування, відпуск і відпал. Фізико-механічні характеристики сталей в залежності від температури загартування найбільш суттєво змінюються в інтервалі від 700<sup>0</sup>С до 820-850<sup>0</sup>С. Причому

підвищення вмісту вуглецю призводить до збільшення як механічних характеристик (рис.2.2) [9], так і питомого електричного опору (рис.2.3) [59].

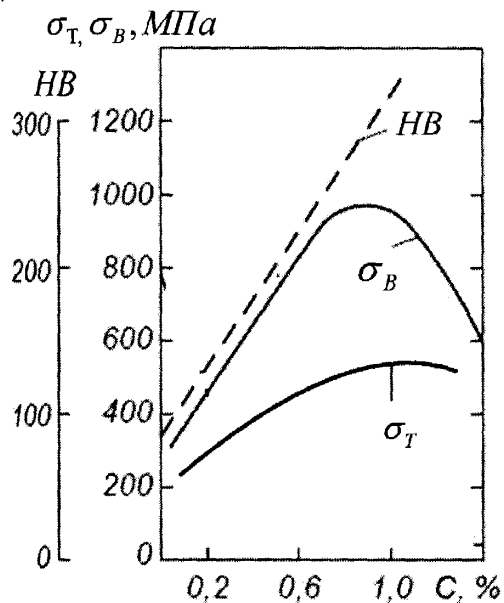


Рис.2.2. Вплив вмісту вуглецю на механічні характеристики сталей

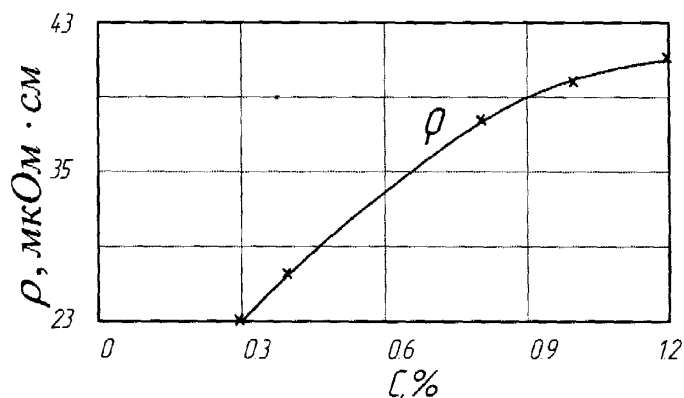


Рис 2.3. Вплив вмісту вуглецю на питомий електричний опір сталей після загартування від 850 °С

Значення питомого електричного опору при однаковому вмісті вуглецю для загартованої сталі значно вище, ніж для відпаленої.

Таким чином, будь-які структурні перетворення та зміни сталі однозначно впливають на величину питомого електричного опору, а також механічних характеристик. Зміна механічних характеристик і питомого опору залежить від одних і тих самих чинників і структурних параметрів, тому якісний характер їх зміни від розглянутих умов дуже схожий. Для прикладу, в роботі [70] вказується на можливість визначення ударної в'язкості сталей, що використовуються для виготовлення роторів турбін, за вимірними значеннями питомого електричного опору.

Тому можна стверджувати, що вибір питомого електричного опору як інформативного параметра контролю механічних характеристик сталей є обґрунтованим [88].

## 2.2. Вибір технічних засобів вимірювання інформативних параметрів

### 2.2.1. Вимірювання твердості

Проведені теоретичні дослідження показали, що взаємозв'язок між механічними характеристиками, такими як границя плинності/границя міцності, з твердістю характеризується стійкими кореляційним зв'язком. Твердість за шкалою Брінеля необхідно вимірювати з точністю до одиниць. З цією метою доцільно використати динамічний твердомір типу ТД-32 (НВФ «Ультракон», м.Київ ). Загальний вигляд та основні технічні характеристики даного твердоміра наведено в додатку Г.

Динамічний твердомір є компактним і зручним у використанні, однак об'єкт контролю повинен відповідати певним вимогам щодо якості та шорсткості поверхні, а також власної маси. Діапазон вимірювання приладу по шкалі Брінеля становить 95-460 НВ, що цілком достатньо для вимірювання твердості конструкційних сталей.

### 2.2.2. Вимірювання питомого електричного опору

На сьогоднішній день існує небагато лабораторних установок для вимірювання питомого електричного з необхідною точністю  $\pm 15$  нОм·м. Так, нормативним документом, що регламентує вимірювання питомого опору сталей, є ГОСТ 12119.7-98 [89], згідно з яким вимірювання здійснюється мостом постійного струму на зразках зі строго визначеними геометричними розмірами. На рахунок електроконтактного чотиризондового методу вимірювання питомого опору, то на даний час існує кілька технічних рішень, які його реалізують [68-71]. Однак вони переважно застосовуються для контролю напівпровідників або їх програмне забезпечення для обробки результатів вимірювань підходить тільки для двох типів ОК (тонка пластина або об'єкт напівнескінченного об'єму).

Так, питомий електричний опір напівнескінченого об'єкту виражається [68]:

$$\rho = 2\pi \cdot S \cdot \frac{U}{I}, \quad (2.6)$$

де  $S$  - відстань між сусідніми зондами;

$U$  - виміряна напруга;

$I$  - сила струму.

Визначення питомого електричного опору належить до опосередкованих вимірювань. При цьому вимагається вимірювати з високою точністю струм у вимірювальному колі та напругу на ділянці між двома внутрішніми зондами. Тому необхідно для цього вибрати відповідні технічні засоби.

З метою встановлення вимогів до технічних засобів, необхідно проаналізувати в якому діапазоні змінюється відношення виміряної напруги  $U$  до струму  $I$ , яке, використовуючи вираз (2.6), можна записати:

$$\frac{U}{I} = \frac{\rho}{2\pi \cdot S} \quad (2.7)$$

Для більшості металів, сталей і сплавів питомий електричний опір знаходиться в межах  $100-1000$  нОм·м. Задамося значенням  $S=10$  мм. Підставляючи ці дані у вираз (2.7), одержуємо діапазон зміни  $\frac{U}{I} = 1.6 \div 16$  мкОм. Для реальних зразків скінчених розмірів відношення (2.7) буде більшим за значення даного діапазону для відповідного значення питомого опору, проте можна стверджувати, що дане відношення знаходиться в межах від кількох одиниць до кількох десятків мікроом.

В такому разі доцільно використовувати в якості вимірювального блоку омметри, принцип дії яких базуються на методі амперметра-вольтметра. Причому, як показали проведені вище розрахунки, це повинен бути клас мікроомметрів з високим вхідним опором вимірювача напруги.

Слід зазначити, що питомий опір є температурно залежною характеристикою. Тому під час контролю необхідно з високою точністю визначати температуру об'єкта контролю і вводити необхідні поправки в

розраховане значення питомого опору через коефіцієнт температурного опору. Для цього доцільно використовувати сучасні цифрові термометри (наприклад, фірми Fluke), оснащені контактними термопарами.

Незважаючи на те, що вимірювання питомого електричного опору сталей на реальних сталевих конструкціях є проблематичним, було вирішено розробити дослідний взірець установки для вимірювання цього параметра. Проте, насамперед, необхідно виконати математичне моделювання процесу контролю питомого електричного опору з метою розрахунку конструктивних параметрів чотиризондового вимірювального перетворювача та впливу реальних розмірів об'єкта контролю на результати вимірювання.

### 2.3. Математичне моделювання процесу вимірювання питомого електричного опору електроконтактним чотиризондовим методом

Вимірювання питомого електричного опору на реальних сталевих конструкціях є досить складною задачею [90]. Незважаючи на це, було вирішено розробити дослідний взірець установки для вимірювання питомого електричного опору та експериментальним шляхом встановити взаємозв'язки механічних характеристик сталей з їх питомим опором  $i$ , відповідно, перевірити розроблений метод контролю.

Для цього спочатку виконано математичне моделювання процесу контролю питомого опору електроконтактним чотиризондовим методом, яке проводилося з метою вирішення двох основних завдань:

1) розрахунок співвідношення відстаней між струмовими та потенціальними (вимірювальними) електродами-зондами з метою підвищення чутливості методу;

2) встановлення аналітичної залежності між шуканим значенням питомого електричного опору матеріалу і виміряними значеннями електричного опору, враховуючи вплив реальних кінцевих розмірів об'єкта контролю на результати вимірювання.

Розглянемо теоретичні основи чотиризондового методу вимірювання питомого електричного опору на зразку, який являє собою напівнескінченний об'єм, обмежений плоскою поверхнею. На поверхні зразка вздовж однієї прямої лінії розміщують чотири металеві електроди-зонди з невеликою площею контакту (див. рис.1.10). Через два зовнішніх зонди пропускають електричний струм, генерований джерелом постійного струму. На двох внутрішніх зондах вимірюють падіння напруги. За виміряними значеннями різниці потенціалів та струму можна визначити величину питомого електричного опору матеріалу зразка.

У системі зонд-об'єкт контролю, як правило, виникають паразитні опори, які можуть вносити суттєву похибку в результат вимірювання (рис.2.4, а). До них належать: 1) опір зондів і провідників  $R_{np}$ ; 2) контактний опір зонда  $R_k$ ; 3) опір розтіканню  $R_{роз}$ . Дані опори асоціюються з кожним із зондів, утворюючи в сукупності так звані перехідні опори, значення яких є різними для різних зондів-електродів.

Використання чотиризондового методу контролю питомого електричного опору сталей дає можливість уникнути впливу на результати вимірювань паразитних перехідних опорів. На рис.2.4, б зображено еквівалентну схему електричного кола при чотиризондовому підключенні до об'єкту контролю.

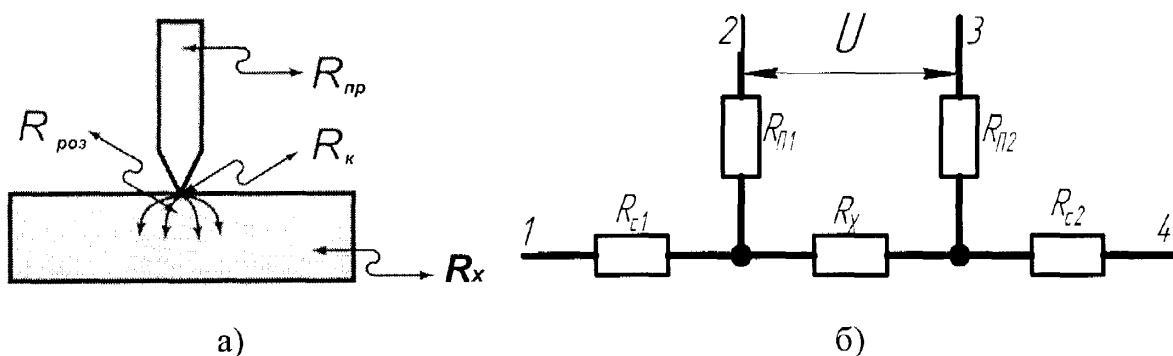


Рис. 2.4. Паразитні опори (а) та еквівалентна схема електричного кола (б) при чотиризондовому підключенні до об'єкту контролю

Із схеми видно, що перехідні опори  $R_{\epsilon 1}$  і  $R_{\epsilon 2}$  струмових контактів 1 і 4 не впливають на напругу  $U$ , пропорційну вимірюваному опору  $R_x$ . Очевидно,

що  $U$  не залежить від перехідних опорів  $R_{1,1}$  і  $R_{1,2}$  потенціальних контактів 2 і 3, оскільки у вимірювальному колі можна знехтувати струмом за рахунок високого значення вхідного опору вимірювача напруги  $U$  [91].

Основна перевага чотиризондового методу полягає в тому, що не потрібно створювати омичні контакти на зразку та є можливість вимірювати питомий опір зразків різних форм і розмірів. Умовою для його застосування з точки зору форми об'єкту контролю є наявність плоскої поверхні, лінійні розміри якої перевищують лінійні розміри системи зондів. Багато особливостей реальних зразків, пов'язаних з їх формою, можна легко врахувати, застосовуючи чотиризондовий метод вимірювання.

Для того щоб знайти аналітичну залежність між питомим електричним опором  $\rho$ , вимірними струмом  $I$  та напругою  $U$ , необхідно вирішити простішу задачу, пов'язану з протіканням постійного струму через окремих зонд, який контактує з плоскою поверхнею об'єкта контролю напівнескінченного об'єму [68] - (рис.2.5).

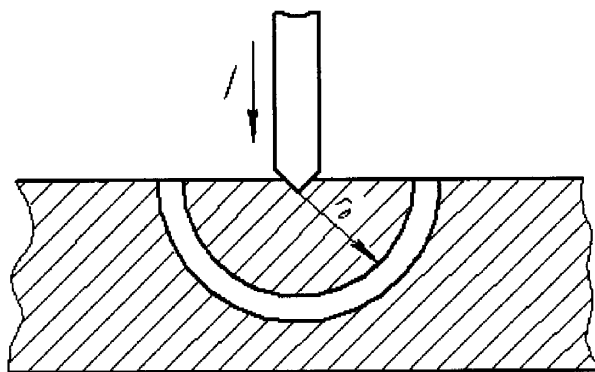


Рис.2.5. Модель зонда

Відомо, що рух електричних зарядів у провідному середовищі характеризується густиною електричного струму  $j$ . З постійним (стаціонарним) струмом нерозривно пов'язані електричне та магнітне поля. Ці поля не залежать один від одного і можуть розглядатися окремо. В даному випадку обмежимося аналізом електричного поля, яке є потенціальним.

Розподіл потенціалу в провідному об'єкті підпорядковується лінійному диференціальному рівнянню з частинними похідними – рівнянню Лапласа:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0,$$

де  $\phi(x, y, z)$ - потенціал точки в тривимірному евклідовому просторі.

Дослідження таких потенціалів і, зокрема, розв'язків диференціального рівняння Лапласа відоме в математиці як *теорія потенціалу* [92].

Оскільки розподіл потенціалу в напівнескінченному об'ємі володіє сферичною симетрією, то лапласіан скалярної функції  $\nabla^2 \phi$  доцільно записати в сферичній системі координат:

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left( \sin \vartheta \frac{\partial \phi}{\partial \vartheta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \vartheta} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \varphi^2} = 0,$$

де  $r, \vartheta, \varphi$  - сферичні координати.

Для розрахунку потенціалу  $\phi(r)$  в об'ємі зразка в залежності від відстані  $r$  до контакту достатньо розв'язати рівняння Лапласа в сферичній системі координат, в якому залишений тільки член, залежний від  $r$ :

$$\Delta \phi(r) = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = 0 \quad (2.8)$$

при умові, що потенціал в точці  $r = 0$  позитивний і прямує до нуля при великих значеннях  $r$ . Проінтегрувавши рівняння (2.8) з врахуванням вказаних граничних умов, отримуємо наступне вирішення:  $\phi(r) = -C/r$ , де константу інтегрування можна визначити з умови для напруженості електричного поля  $E$  при деякому значенні  $r = r_0$ :

$$E(r_0) = - \left. \frac{d\phi(r)}{dr} \right|_{r=r_0} = j\rho = \frac{I \cdot \rho}{2\pi \cdot r_0},$$

де  $j = \frac{I}{2\pi \cdot r_0}$  - густина струму, що протікає через напівсферу радіусом  $r_0$  (див. рис.2.5).

В кінцевому випадку отримаємо:

$$\phi(r) = \frac{I\rho}{2\pi \cdot r}. \quad (2.9)$$

Очевидно, що розподіл потенціалу буде таким самим, якщо зонд має з поверхнею зразка контакт у вигляді напівсфери скінченного діаметра. Нехай



радіус контакту рівний  $r_1$ , тоді падіння напруги на зразку рівне потенціалу зонда і складає:

$$\phi = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{r_1}. \quad (2.10)$$

Прирівнюючи падіння напруги на приконтатному шарі товщиною  $r_2 - r_1$

$$\phi(r_1) - \phi(r_2) = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}. \quad (2.11)$$

і повного падіння напруги на зразку (2.10), можна спостерігати основну зміну потенціалу ближче до зонда. Для наочності при  $r_2 = 10r_1$  повне падіння напруги на зразку перевищує падіння в шарі  $r_2 - r_1$  лише на 10% [68]. Це свідчить про те, що величина струму, що протікає через зонд, визначається головним чином опором приконтатної області, протяжність якої тим менше, чим менший радіус контакту.

Отже, враховуючи вище сказане, необхідними умовами застосування чотиризондового методу для вимірювання питомого електричного опору матеріалів  $\epsilon$ : 1) вимірювання проводяться на плоскій поверхні об'єкту контролю, лінійні розміри якого в кілька раз більші за розміри системи зондів; 2) зонди мають контакти з поверхнею ОК в точках, які розміщені вздовж прямої лінії; 3) межа між струмовими електродами і ОК мають форму напівсфери малого діаметру; 4) діаметр контакту зонда малий порівняно з відстанню між зондами.

Потенціал в будь-якій точці зразка рівний сумі потенціалів, які створюються в цій точці струмом кожного електрода (рис.2.6). При цьому потенціал має додатній знак для струму, що втікає в зразок (зонд 1), і від'ємний для струму, що витікає зі зразка (зонд 4).

Таким чином, потенціали вимірювальних зондів 2 і 3 можна записати відповідно:

$$\phi_2 = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left( \frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} \right); \quad \phi_3 = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left( \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_3} \right).$$

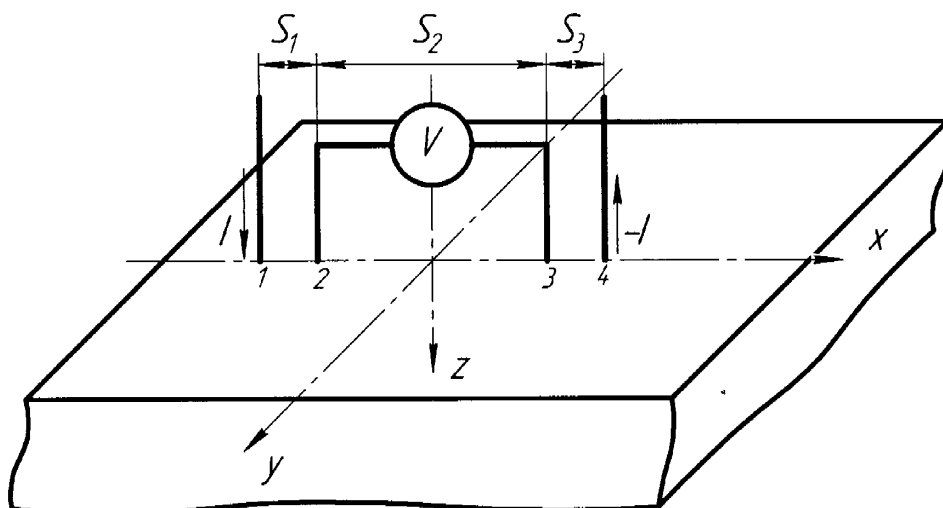


Рис.2.6. Ілюстрація до виведення формули для питомого електричного опору при чотиризондовому методі вимірювання

Різниця потенціалів при цьому рівна:

$$U = \phi_2 - \phi_3 = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left( \frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} + \frac{1}{S_3} \right). \quad (2.12)$$

З виразу (2.12) отримуємо формулу для визначення питомого електричного опору матеріалу зразка:

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} + \frac{1}{S_3} \right)}. \quad (2.13)$$

У випадку коли відстань між зондами однакова ( $S_1 = S_2 = S_3 = S$ ), то [68]:

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot 2\pi S. \quad (2.14)$$

Слід зазначити, що вираз (2.14) справедливий тільки для напівнескінченного об'єкта, тобто зразка, лінійні розміри якого набагато більші за відстань між зондами  $S$ . Для розрахунку питомого електричного опору об'єкта з кінцевими поперечними розмірами та товщиною, необхідно вводити геометричну функцію поправки, яка залежить від розмірів системи зондів, орієнтації вимірювального перетворювача відносно країв зразка та габаритних розмірів зразка.

Із аналізу розподілу потенціалу (2.9), падіння напруги (2.11) та густини струму в зразку в залежності від координати впливає, що:

- для застосування чотиризондового методу вимірювання достатньо, щоб зразок був однорідним в області з лінійними розмірами порядку  $5S$  (якщо  $S \gg r_1$ );
- виміряне значення питомого електричного опору відповідає значенню питомого опору підповерхневого шару товщиною близько  $S$ .

2.3.1. Теоретичні дослідження щодо підвищення чутливості чотиризондового методу та розрахунку взаємного розміщення зондів

Вираз (2.14) для випадку рівності відстані між зондами, як правило, використовують для розрахунку відносно великих значень питомого електричного опору напівпровідників. Для вимірювання малих значень питомого електричного опору металів є доцільним підвищити чутливість чотиризондового вимірювального перетворювача.

Як впливає з виразу (2.12), чутливість чотиризондового методу за напругою прямопропорційна величині постійного струму та оберненопропорційна еквівалентній відстані між зондами [68]:

$$\frac{1}{S_{екв}} = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_2 + S_3}. \quad (2.15)$$

Оскільки збільшення сили струму, що протікає через зразок, обмежене допустимим нагріванням зразка, то підвищити чутливість методу можна, зменшуючи еквівалентну відстань між зондами  $S_{екв}$  за рахунок збільшення відстані  $S_2$  між внутрішніми вимірювальними зондами 2 і 3 і зменшення відстаней  $S_1$  та  $S_3$  між струмовими та потенціальними зондами (відповідно 1-2 і 3-4). Для наочності проілюструємо графічно залежності еквівалентної відстані від зміни лінійних розмірів системи зондів.

На рис. 2.7 зображено графічну залежність еквівалентної відстані між зондами  $S_{екв}$  від відстані між струмовими та потенціальними контактами  $S$  ( $S_1 = S_3 = S$ ) при фіксованій відстані між потенціальними зондами ( $S_2 = 30\text{мм}$ ).

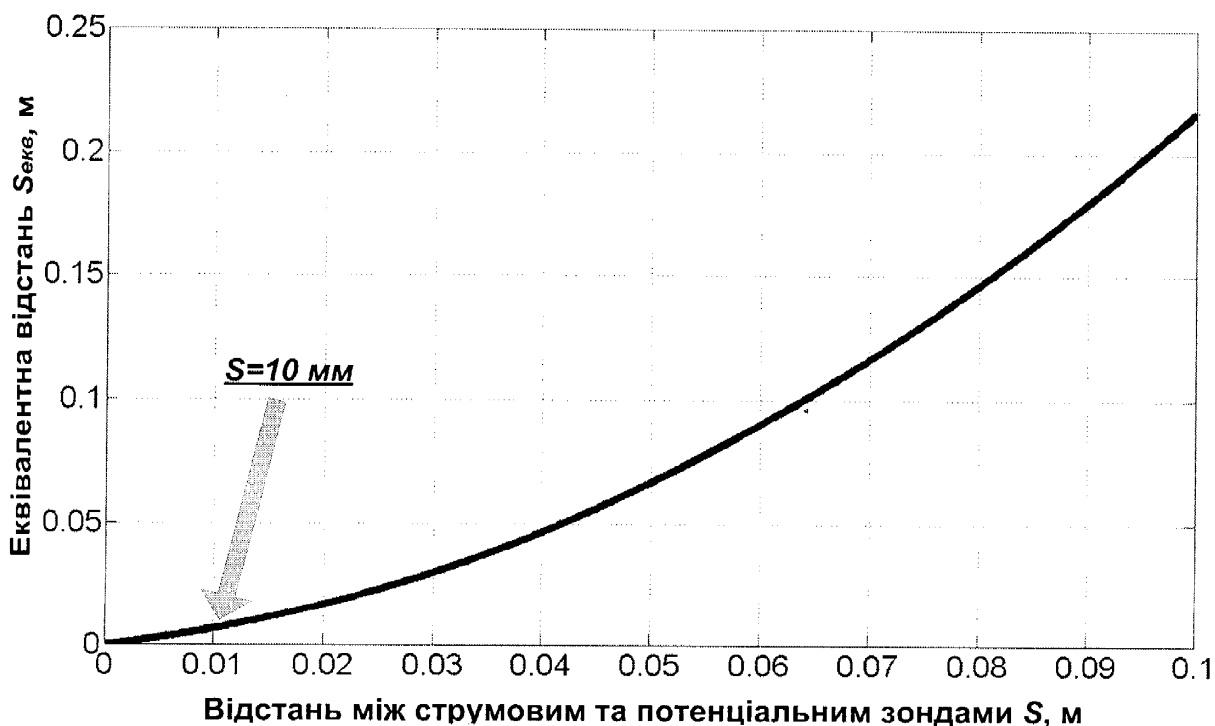


Рис.2.7. Графік залежності еквівалентної відстані між зондами від відстані між відповідними струмовими та потенціальними зондами (при  $S_2 = 30\text{ мм}$ )

Аналізуючи графічну залежність (рис.2.7), можна стверджувати, що зменшення відстані  $S$  веде до зменшення еквівалентної відстані  $S_{екв}$  і, відповідно, до збільшення чутливості чотирьохзондового методу. Враховуючи те, що в реальній конструкції чотирьохзондового вимірювального перетворювача діаметр одного зонда становить кілька міліметрів, то оптимальна відстань між струмовими та відповідними їм потенціальними контактами повинна становити  $10\text{ мм}$ .

Проілюструємо тепер, яким чином змінюється еквівалентна відстань  $S_{екв}$  в залежності від зміни відстані  $S_2$  між потенціальними зондами при фіксованій оптимальній відстані  $S = S_1 = S_3 = 10\text{ мм}$  (рис.2.8). Отже, збільшення відстані  $S_2$  між потенціальними контактами до  $20\text{--}30\text{ мм}$  призводить до різкого зменшення еквівалентної відстані  $S_{екв}$  і, відповідно, до збільшення чутливості чотирьохзондового методу. В області  $S_2 > 40\text{ мм}$  зменшення значення  $S_{екв}$  відбувається повільніше, а при  $S_2 > 60\text{ мм}$  зменшення еквівалентної відстані не є

значним. Це свідчить про недоцільність конструювання вимірювального перетворювача з досить високим значенням відстані  $S_2$ , оскільки при  $S_2 \geq 60$  мм незначне підвищення чутливості чотиризондового методу не є пріоритетним. В даному випадку пріоритетним є питання зменшення габаритних розмірів вимірювального перетворювача, що реалізує чотиризондовий метод.

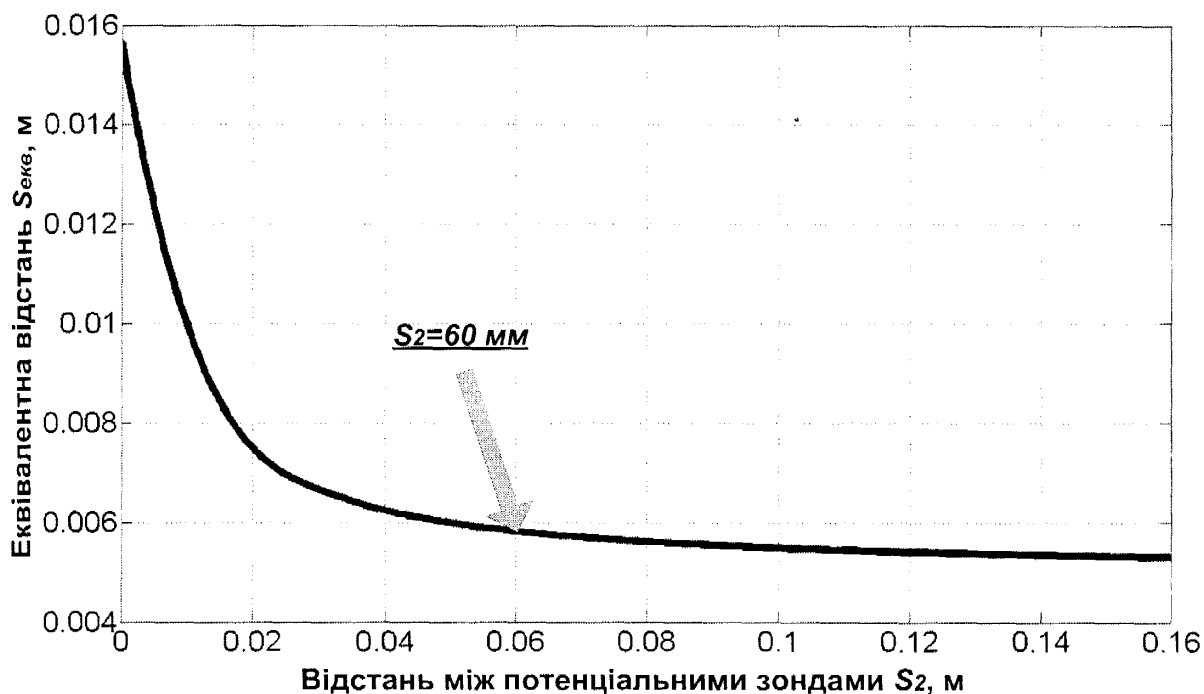


Рис 2.8. Графік залежності еквівалентної відстані між зондами від відстані між потенціальними зондами (при  $S_1 = S_3 = 10$  мм)

Враховуючи вище сказане, розраховані лінійні розміри системи зондів є такими: відстань між струмовими та відповідними їм потенціальними контактами -  $S = S_1 = S_3 = 10$  мм; відстань між потенціальними контактами -  $S_2 = 60$  мм.

### 2.3.2. Застосування методу до зразків простої геометричної форми

#### А) Зразок напівнескінченного об'єму з ізолюючою границею

Як вже зазначалося, вираз (2.13) можна застосовувати для визначення питомого електричного опору об'єкта напівнескінченного об'єму, лінійні

розміри якого набагато більші за розміри системи зондів. Даний критерій застосування формули (2.13) по суті являється напівкількісним, оскільки не враховує точного співвідношення між розмірами зразка і лінійними розмірами системи зондів. З метою отримання більш строгих критеріїв застосування виразу (2.13) розглянемо часткові випадки вимірювання питомого електричного опору зразків з обмеженими лінійними розмірами, що дуже часто зустрічається на практиці.

Проаналізуємо детально наступний випадок. Зразок напівнескінченного об'єму має плоску ізолюючу границю. Зонди розміщені на лінії, перпендикулярній до цієї границі (рис.2.9). Наявність ізолюючої границі на одній із граней зразка зумовлює необхідність виконання однорідної граничної умови Неймана, тобто на ізолюючій границі нормальна складова струму, а, відповідно, і електричного поля рівна нулю. Дана гранична умова буде виконана, якщо знаки дзеркальних джерел струму співпадають зі знаками реальних струмів, що протікають через зонди 1 і 4.

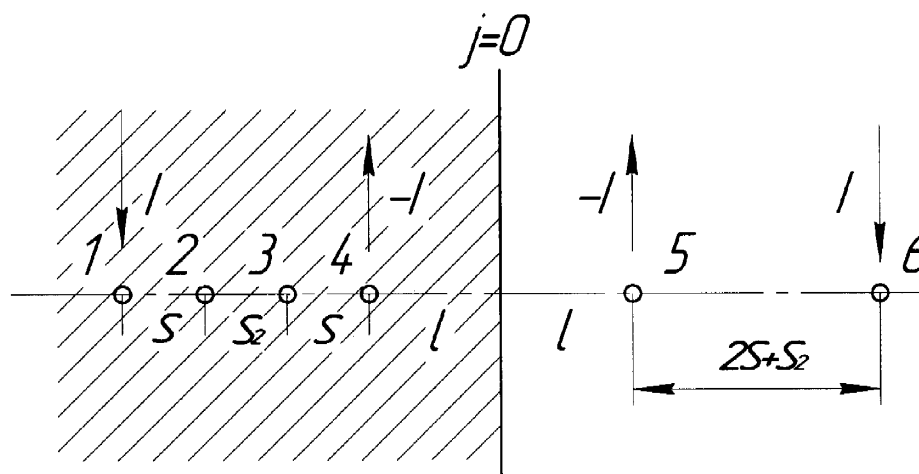


Рис. 2.9. Система джерел дзеркальних відображень на зразку напівнескінченного об'єму з ізолюючою поверхнею

Використаємо метод дзеркальних відображень, який широко використовується в електростатиці. Для цього на продовженні лінії розміщення зондів симетрично відносно ізолюючої границі розмістимо два уявних контакти джерела струму 5 і 6 таких, щоб задовольнити граничну умову Неймана на

ізолюючій границі. Граничну умову на ізолюючій границі буде виконано, якщо, вважаючи зразок напівнескінченим, в точку 5 помістити від'ємне джерело струму  $-I$ , а в точку 6 – додатне джерело струму  $I$ . Оскільки для даної граничної умови існує єдине рішення задачі, то вирішення для системи джерел струму  $I$ , 4, 5 і 6 буде шуканим. Розраховуючи потенціали в точках 2 і 3 зі врахуванням чотирьох джерел струму, одержуємо:

$$\phi_2 = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left( \frac{1}{S} - \frac{1}{S+S_2} - \frac{1}{S+S_2+2l} + \frac{1}{3S+2S_2+2l} \right); \quad (2.16)$$

$$\phi_3 = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left( \frac{1}{S+S_2} - \frac{1}{S} - \frac{1}{S+2l} + \frac{1}{3S+S_2+2l} \right); \quad (2.17)$$

де  $l$  - відстань від зонда 4 до ізолюючої границі.

Враховуючи співвідношення  $m = S_2/S$  та формули (2.16), (2.17) одержуємо вираз для різниці потенціалів між зондами 2 і 3:

$$U = \phi_2 - \phi_3 = \frac{I \cdot \rho}{2\pi \cdot S} \left( 2 - \frac{2}{m+1} - \frac{1}{m+1+2l/S} + \frac{1}{3+2m+2l/S} + \frac{1}{1+2l/S} - \frac{1}{3+m+2l/S} \right); \quad (2.18)$$

З виразу (2.18) одержуємо формулу для розрахунку питомого електричного опору зразка:

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot 2\pi S \cdot f(m, l/S), \quad (2.19)$$

де  $f(m, l/S)$  - геометрична функція поправки, яка залежить від лінійних розмірів системи зондів ( $S$ ), їх співвідношення ( $m = S_2/S$ ) та відстані ізолюючої границі до найближчого струмового зонда.

Геометрична функція поправки для даного випадку рівна:

$$f(m, l/S) = \left( \frac{2m}{m+1} - \frac{1}{m+1+2l/S} + \frac{1}{3+2m+2l/S} + \frac{1}{1+2l/S} - \frac{1}{3+m+2l/S} \right)^{-1}. \quad (2.20)$$

Графік геометричної функції поправки  $f(m, l/S)$  представлений на рис.2.10.

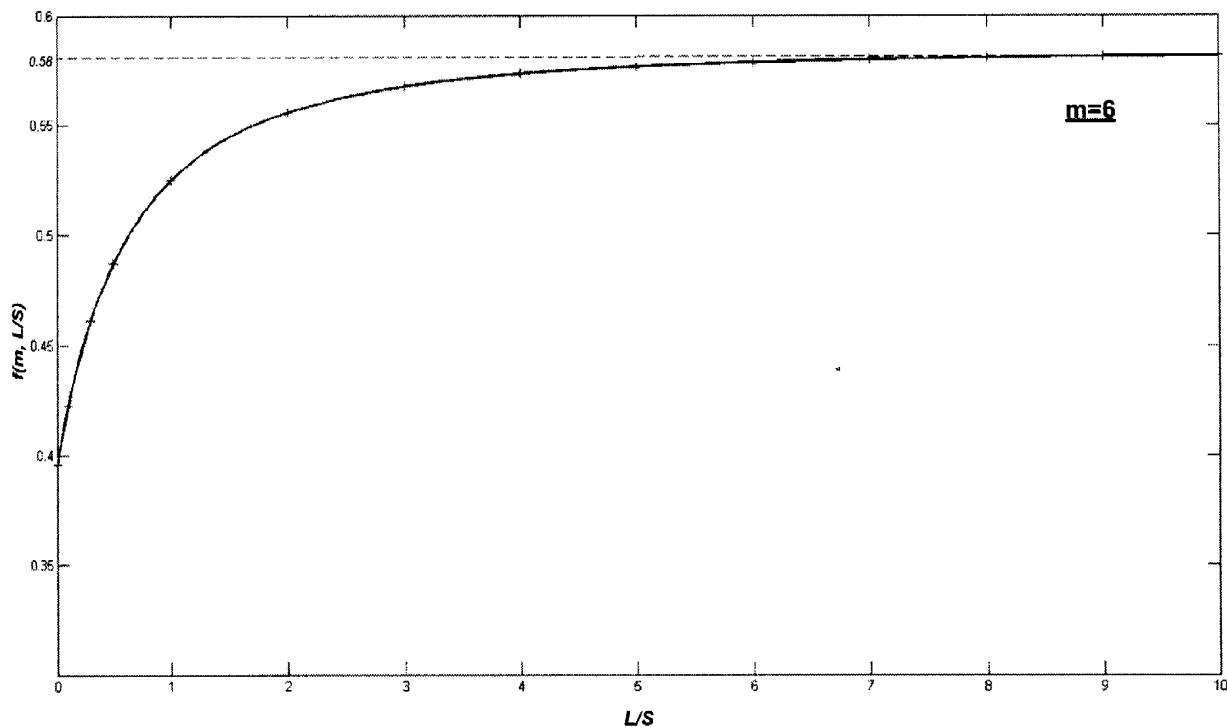


Рис.2.10. Геометрична функція поправки  $f(m, l/S)$  для зразка напівнескінченного об'єму з ізолюючою границею (при умові  $m = S_2/S = 6$ )

У випадку, якщо  $l = 0$ , тобто коли зонд 4 встановлений на ізолюючій границі зразка, то  $f(m, l/S) = 0.4$ ; якщо  $l \geq 5S$ , то геометрична функція поправки наближається до значення  $0.583$  (коефіцієнт поправки  $K$ ).

При умові, якщо  $m = 1$  (зонди розміщені на одній відстані один від одного), то при  $l \geq 5S$  геометрична функція поправки майже не відрізняється від одиниці. В такому разі ( $K=1$ ) для розрахунку питомого електричного опору можна використовувати формулу (2.14).

На рис.2.11 наведено графік залежності коефіцієнта поправки, до якого прямує геометрична функція поправки  $f(m, l/S)$  при  $l \geq 5S$ , від співвідношення лінійних розмірів системи зондів  $m$ .

Аналогічно, використовуючи метод дзеркальних відображень, можна розрахувати питомий електричний опір напівнескінченного зразка для випадку, коли лінія зондів розміщена паралельно до ізолюючої границі:

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot 2\pi S \cdot q(m, l/S),$$



де  $q(m, l/S)$ - геометрична функція поправки, яка розраховується наступним чином:

$$q(m, l/S) = \left( \frac{2m}{m+1} + \frac{2}{\sqrt{1 + \left(\frac{2l}{S}\right)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(m+1)^2 + \left(\frac{2l}{S}\right)^2}} \right)^{-1}$$

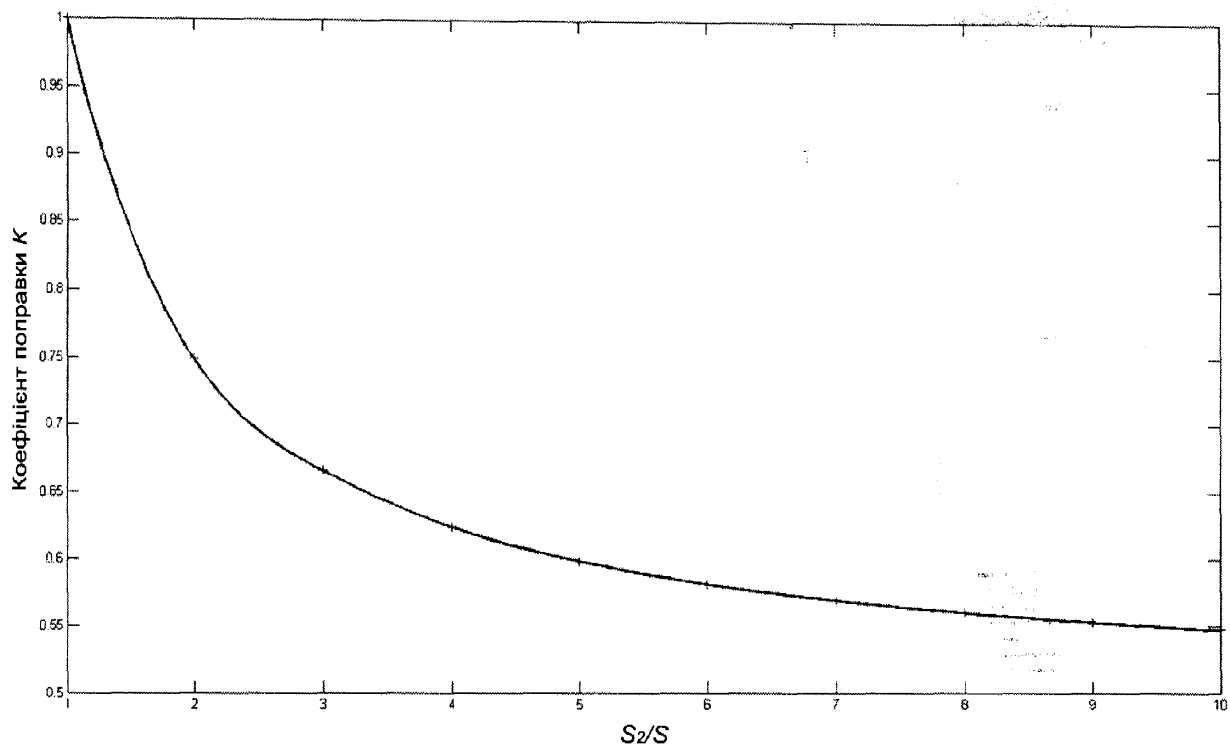


Рис.2.11. Графік залежності коефіцієнта поправки  $K$  від співвідношення лінійних розмірів системи зондів  $m$

Графік геометричної функції поправки  $q(m, l/S)$  представлений на рис.2.12.

Якщо  $l \geq 5S$ , то геометрична функція поправки наближається до значення 0.583 (коефіцієнт поправки  $K$ ).

При умові, якщо  $m=1$  (зонди розміщені на одній відстані один від одного), то при  $l \geq 5S$  геометрична функція поправки майже не відрізняється від одиниці. В такому разі ( $K=1$ ) для розрахунку питомого електричного опору можна використовувати формулу (2.14).

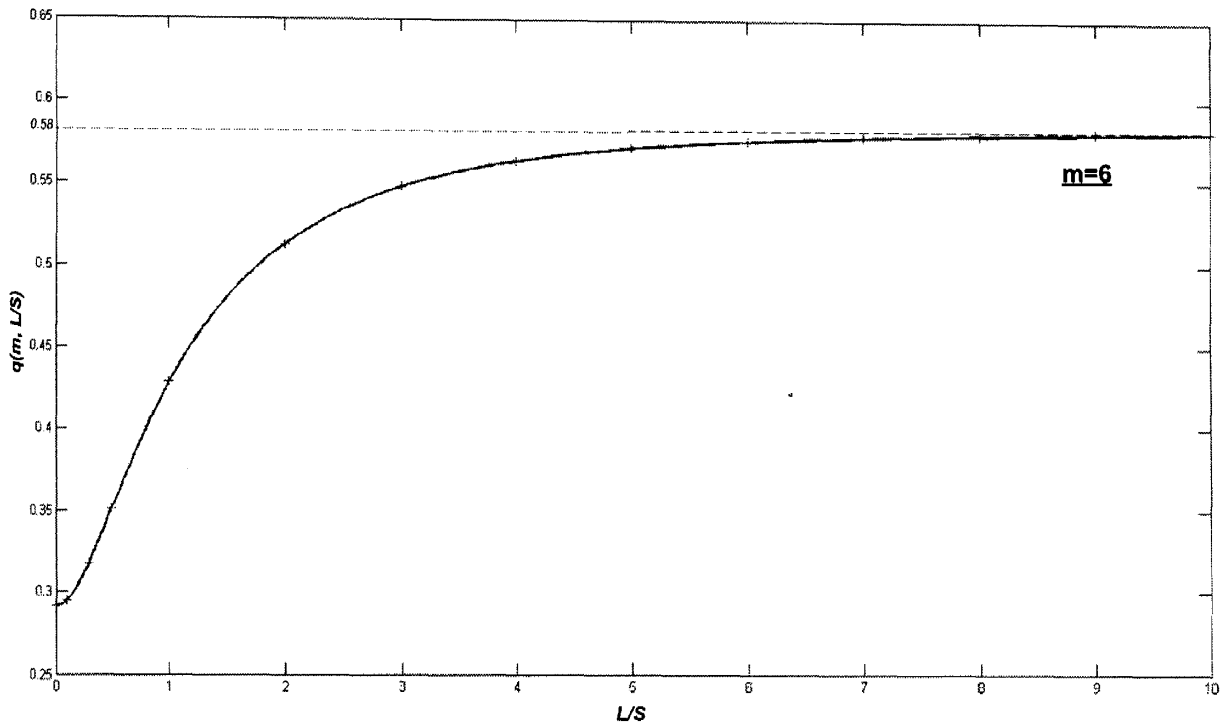


Рис.2.12. Геометрична функція поправки  $q(m, l/S)$  для зразка напівнескінченного об'єму з ізолюючою границею (при паралельному розміщенні системи зондів відносно границі,  $m = 6$ )

#### Б) Зразок напівнескінчених лінійних розмірів та кінцевої товщини

Значення питомого електричного опору зразка напівнескінчених лінійних розмірів та кінцевої товщини по результатам вимірювання чотиризондовим методом, як і для зразка напівнескінченного об'єму з ізолюючою границею, зводиться до розрахунку геометричної функції поправки.

Розглянемо простий випадок плоскої пластини безкінчних розмірів, але кінцевої товщини із ізолюючими верхньою і нижньою границями (рис.2.13).

Використовуючи метод дзеркальних відображень, розмістимо на відстані  $h$  нижче нижньої ізолюючої границі уявні точкові джерела струму  $I$  та  $-I$ . Уводячи дані джерела постійного струму, виконуємо на нижній ізолюючій поверхні однорідну граничну умову Неймана ( $j_n = 0$ ). Проте при цьому порушиться вимога рівності нулю нормальної складової струму на верхній поверхні пластини. Щоб виконати однорідну граничну умову на верхній

поверхні пластини введемо на відстані  $2h$  вище пластини також два уявних точкових джерела струму  $I$  та  $-I$ .

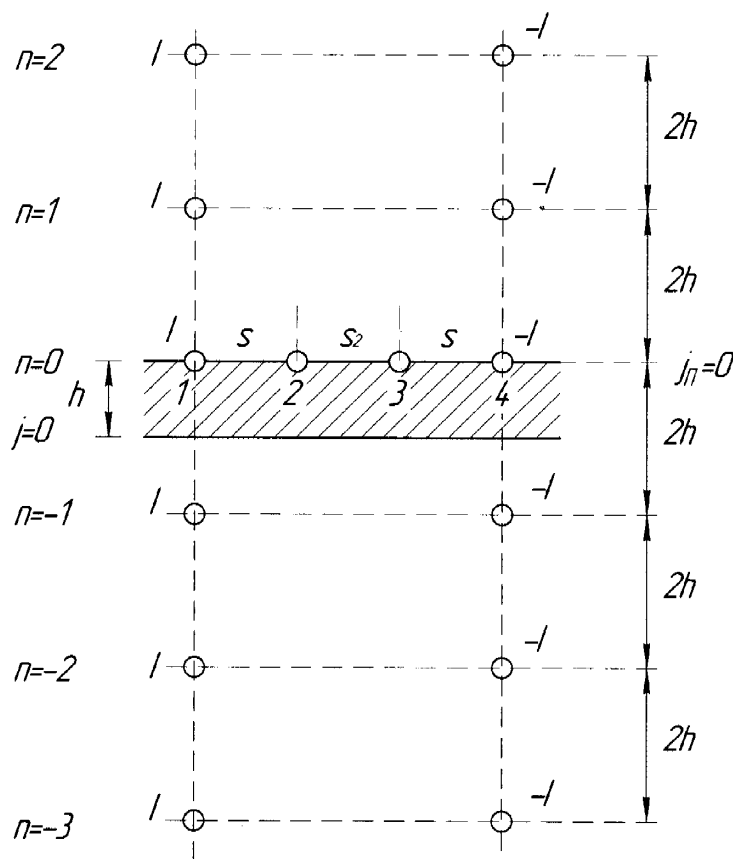


Рис. 2.13. Система джерел дзеркальних відображень для пластини з верхньої та нижньої ізолюючими границями

Гранична умова Неймана на верхній поверхні пластини буде виконана, проте знову порушиться гранична умова на нижній ізолюючій поверхні. Звідси випливає, що процес введення уявних джерел струму можна продовжувати до безкінечності (спочатку на відстані  $3h$  від нижньої поверхні, потім на відстані  $4h$  від верхньої поверхні пластини і т.д.).

Значення потенціалів на вимірювальних зондах 2 і 3 можна розрахувати, сумуючи потенціали, які створюються в даній точці кожним із джерел струму:

$$\phi_2 = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left( \frac{1}{S} - \frac{1}{S + S_2} + \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{1}{\sqrt{S^2 + (2h \cdot n)^2}} - \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{1}{\sqrt{(S + S_2)^2 + (2h \cdot n)^2}} \right);$$

$$\phi_3 = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left( \frac{1}{S + S_2} - \frac{1}{S} - \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{1}{\sqrt{S^2 + (2h \cdot n)^2}} + \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{1}{\sqrt{(S + S_2)^2 + (2h \cdot n)^2}} \right),$$

де  $h$  - товщина провідної пластини,

$n$  - рівень дзеркального відображення джерела струму.

Враховуючи симетрію вирішуваної задачі, отримуємо:

$$\sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{1}{\sqrt{S^2 + (2h \cdot n)^2}} = 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{\sqrt{S^2 + (2h \cdot n)^2}};$$

$$\sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{1}{\sqrt{(S + S_2)^2 + (2h \cdot n)^2}} = 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{\sqrt{(S + S_2)^2 + (2h \cdot n)^2}}.$$

Тоді різниця потенціалів між вимірювальними зондами 2 і 3 розраховується так:

$$U = \phi_2 - \phi_3 = \frac{I \cdot \rho}{\pi} \left( \frac{1}{S} - \frac{1}{S + S_2} + 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{\sqrt{S^2 + (2h \cdot n)^2}} - 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{\sqrt{(S + S_2)^2 + (2h \cdot n)^2}} \right). \quad (2.21)$$

Враховуючи те, що  $S_2 = m \cdot S$ , з виразу (2.21) одержимо вираз для розрахунку питомого електричного опору пластини:

$$\rho = \frac{U}{I} \pi \cdot \left\{ \frac{m}{S(m+1)} + \frac{2}{S} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{\sqrt{1 + 4n^2 \left(\frac{h}{S}\right)^2}} - \frac{2}{S} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{\sqrt{(m+1)^2 + 4n^2 \left(\frac{h}{S}\right)^2}} \right\}^{-1}.$$

В кінцевому випадку отримаємо:

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot 2\pi S \cdot f(m, h/S), \quad (2.22)$$

де  $f(m, h/S)$  - геометрична функція поправки, яка залежить від відношення товщини пластини  $h$  до відстані між зондами  $S$ .

При цьому геометрична функція поправки рівна:

$$f(m, h/S) = \left\{ \frac{2m}{m+1} + 4 \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 4n^2 \left(\frac{h}{S}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(m+1)^2 + 4n^2 \left(\frac{h}{S}\right)^2}} \right] \right\}^{-1}. \quad (2.23)$$

Графік геометричної функції поправки  $f(m, h/S)$  представлений на рис.

2.14.

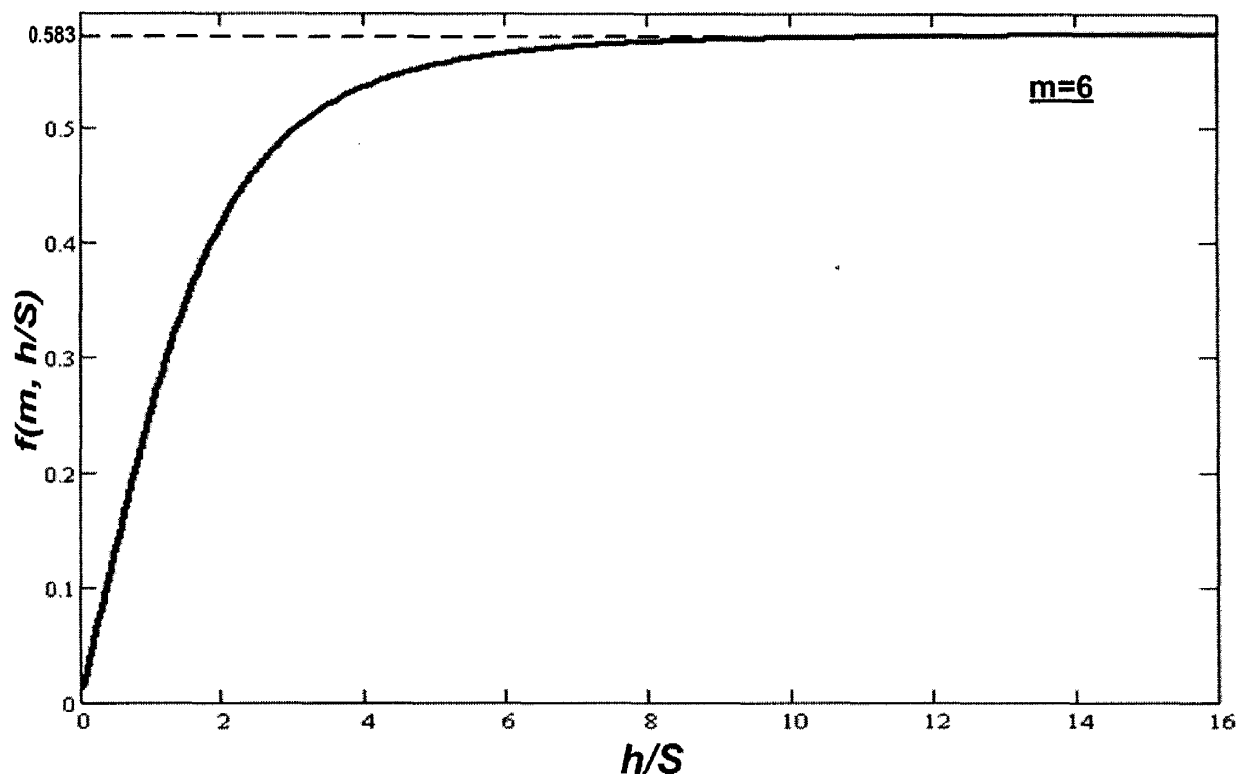


Рис.2.14. Геометрична функція поправки  $f(m, h/S)$  для пластины з двома ізолюючими границями

З рис.2.14 бачимо, що зі зменшенням товщини зразка і досягнення значення, яке рівне приблизно  $4S$ , наявність нижньої поверхні починає впливати на орієнтацію ліній струму. В дуже тонких пластинах струм поширюється майже однорідно по товщині, про що свідчить лінійна залежність геометричної функції поправки від  $h/S$  в інтервалі значень від 0 до 0.4. В роботі [68] вказано, що в даному інтервалі при  $m=1$  геометрична функція поправки прямує до значення  $(2\ln 2)^{-1} h/S$ , тому в такому випадку питомий електричний опір зразка розраховується як  $\rho = \frac{\pi \cdot h}{\ln 2} \cdot \frac{U}{I}$  і не залежить від відстані між зондами.

Реальні зразки мають бокові грані, які впливають на поширення струму. Тому наявність кінцевих розмірів по всіх координатах зразка зумовлює необхідність введення відповідних геометричних функцій поправки. Такі

функції можуть бути розраховані в результаті вирішення рівняння Лапласа з відповідними граничними умовами на бокових гранях зразка.

Застосувавши метод дзеркальних відображень для зразка прямокутної форми, можна розрахувати геометричні функції поправки, які залежать від геометричних розмірів зразка (рис.2.15).

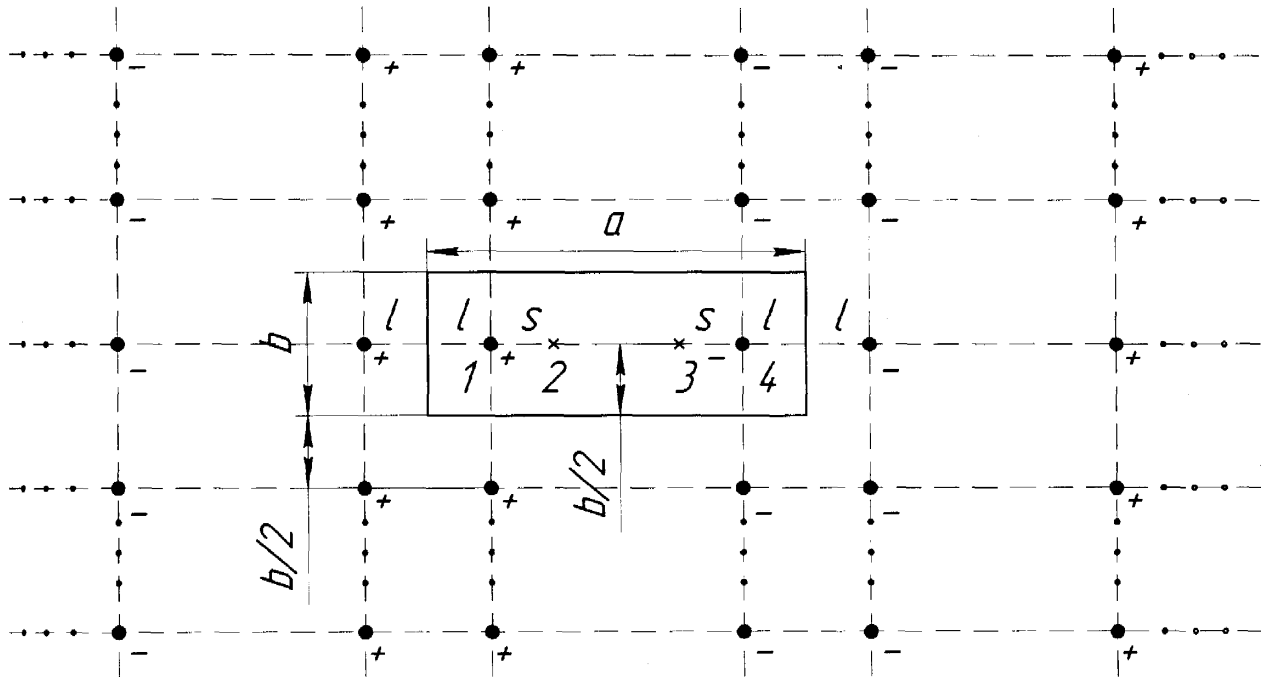


Рис.2.15. Система джерел дзеркальних відображень для пластини прямокутної форми з ізолюючими гранями

Для зразків прямокутної форми, які часто зустрічаються на практиці, при розміщенні зондів вздовж центральної лінії, паралельній довгій стороні прямокутника, питомий електричний опір розраховується наступним чином:

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot 2\pi S \cdot f(m, a/S, b/S), \quad (2.24)$$

де  $f(a/S, b/S)$  - геометрична функція поправки, яка залежить від відношення відповідно довжини  $a$  і ширини  $b$  прямокутника до відстані між зондами  $S$ .

Специфіка побудови системи джерел дзеркальних відображень, зображеної на рис. 2.15, аналогічна попереднім випадкам. Складність її конфігурації зумовлена необхідністю виконання на всіх бокових гранях зразка однорідної граничної умови Неймана ( $j_n = 0$ ).

Можна показати, що для даної конфігурації системи джерел дзеркальних відображень, геометрична функція поправки буде мати такий вигляд:

$$f\left(m, \frac{a}{S}, \frac{b}{S}\right) = \left[ \frac{-2m}{m+1} + \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^k \cdot \left\{ \begin{array}{l} 2[n^2(b/S)^2 + (k(a/S)+1)^2]^{1/2} + \\ + 2[n^2(b/S)^2 + (k(a/S)-1)^2]^{1/2} - \\ - 2[n^2(b/S)^2 + (k(a/S)+[m+1])^2]^{1/2} - \\ - 2[n^2(b/S)^2 + (k(a/S)-[m+1])^2]^{1/2} \end{array} \right\} \right]^{-1} \quad (2.25)$$

З метою врахування впливу товщини пластини прямокутної форми на результати вимірювання питомого електричного опору чотиризондовим методом, тобто для більш точного розрахунку геометричної функції поправки, необхідно враховувати вплив потенціалів тривимірної системи диполів (рис.2.16). На рис. 2.16 схематично зображена просторова конфігурація джерел дзеркальних відображень, завдяки чому на всіх шести гранях виконується однорідна гранична умова Неймана ( $j_n = 0$ ).

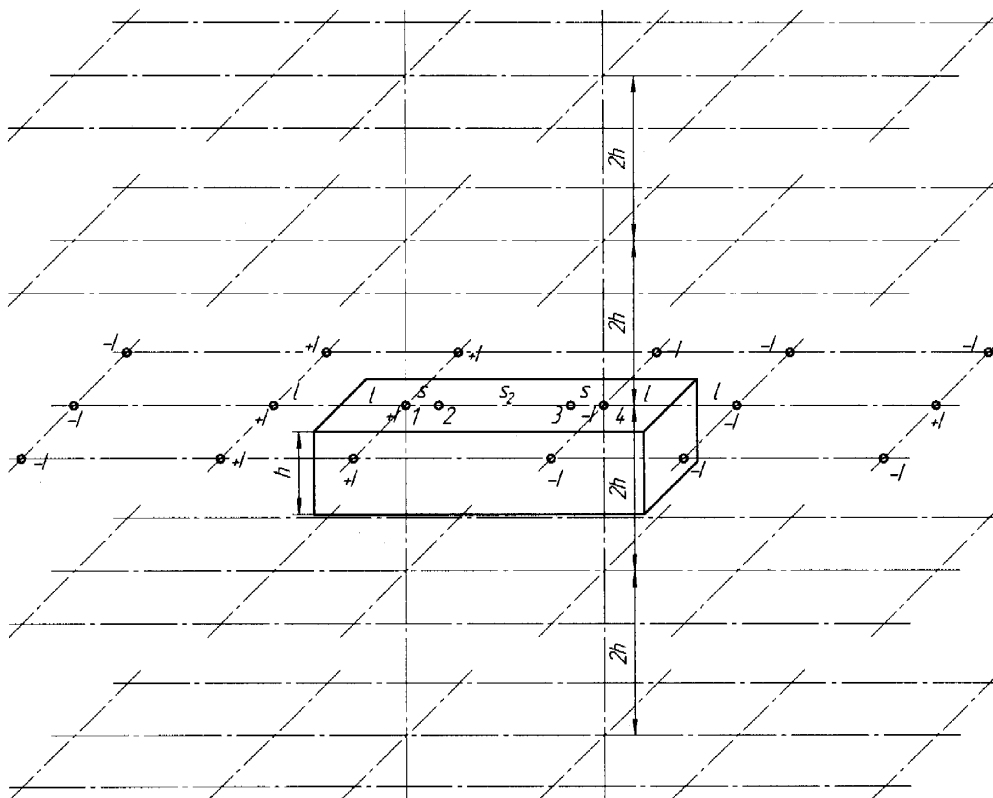


Рис.2.16. Система джерел дзеркальних відображень для пластини прямокутної форми кінцевої товщини з ізолюючими гранями і поверхнями

В даному випадку питомий електричний опір прямокутної пластини з кінцевими розмірами і товщиною розраховується [93]:

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot 2\pi S \cdot f(m, a/S, b/S, h/S), \quad (2.26)$$

де  $f(m, a/S, b/S, h/S)$  - геометрична функція поправки, яка залежить від реальних кінечних розмірів (довжини  $a$ , ширини  $b$  та товщини  $h$ ) пластини та від співвідношення лінійних розмірів системи зондів  $m$ :

$$f\left(m, \frac{a}{S}, \frac{b}{S}, \frac{h}{S}\right) = \left( \frac{-2m}{m+1} + \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{g=0}^{\infty} \left[ (-1)^k \cdot \left\{ \frac{2[n^2(b/S)^2 + (k(a/S) \pm 1)^2 + 4g^2(h/S)^2]^{1/2} -}{-2[n^2(b/S)^2 + (k(a/S) \pm [m+1])^2 + 4g^2(h/S)^2]^{1/2}} \right\} \right] \right)^{-1} \quad (2.27)$$

Отже, у всіх випадках, коли розміри зразка набагато більші за лінійні розміри системи зондів, то зразок можна вважати напівнескінченим, і тоді питомий електричний опір розраховується так:

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot 2\pi S \cdot K. \quad (2.28)$$

де  $K = \frac{m+1}{2m}$  - коефіцієнт поправки, який залежить тільки від співвідношення відстаней між зондами. Для випадку, коли  $m=1$ ,  $K=1$ , для  $m=6$ ,  $K=0.583$ .

Висновки до розділу.

Одержані шляхом теоретичних досліджень результати щодо розробленого методу контролю механічних характеристик сталей можна звести до наступних висновків:

1) розроблено підхід, який дав змогу удосконалити метод визначення механічних характеристик сталей, який полягає в урахуванні кількох інформативних параметрів та використанні алгоритмів штучних нейронних мереж для встановлення взаємозв'язків між досліджуваними характеристиками;

2) шляхом кореляційного та графічного аналізу, а також теоретичних пошукових досліджень як інформативні параметри контролю границі плинності вибрано наступний комплекс параметрів: твердість та питомий електричний опір;



3) використовуючи відхилення у законі Відемана-Франца для іноземних марок сталей, показано що питомий електричний опір краще корелює з механічними характеристиками в межах окремих структур. Зокрема, коефіцієнт кореляції між питомим опором та границею плинності сталей феритно-перлітної (дулексної) структури становить  $0.759$ . Приведено теоретичне пояснення взаємозв'язків між механічними характеристиками та питомим електричним опором;

4) проведено математичне моделювання процесу контролю питомого опору електроконтактним чотиризондовим методом з метою розрахунку відстаней між зондами вимірювального перетворювача для підвищення чутливості методу. При цьому розрахована відстань між струмовими та відповідними потенціальними контактами становить  $10$  мм, а оптимальна відстань між потенціальними контактами -  $60$  мм;

5) у результаті математичного моделювання, використовуючи метод дзеркальних відображень, встановлено аналітичну залежність для геометричної функції поправки, яку необхідно враховувати при розрахунку питомого електричного опору плоских зразків правильної геометричної форми. Показано, що, якщо розміри зразка є набагато більшими за лінійні розміри системи зондів, то геометрична функція поправки зводиться до конкретного числа, яке залежить тільки від співвідношення відстаней між зондами. Для розрахованих відстаней між зондами (п.4) функція поправки зводиться до числа  $0.583$ .

6) аналіз можливості вимірювання обраних параметрів показав, що із задовільною точністю вимірювання твердості можна виконувати серійними твердомірами типу ТД-32, а для вимірювання питомого електричного опору сталей необхідно, в першу чергу, розробити чотиризондовий контактний механізм за результатами математичного моделювання.

## РОЗДІЛ 3

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

Експериментальні дослідження проводились з метою перевірки теоретичних досліджень, одержаних у другому розділі, згідно з якими для визначення механічних характеристик сталей доцільно використовувати метод контролю, який передбачає комплексне врахування кількох інформативних параметрів (твердості та питомого електричного опору).

Відповідно до поставлених завдань і з метою забезпечення достовірності результатів досліджень, була розроблена методика проведення експериментальних досліджень, яка вимагає виконання наступних етапів:

- встановлення залежності геометричної функції поправки, яка входить у формулу розрахунку питомого електричного опору, від геометричних розмірів зразків з метою перевірки адекватності математичної моделі;
- порівняльних експериментальних досліджень з визначення твердості стаціонарним та портативними твердомірами з метою встановлення достовірності показів переносних твердомірів в реальних польових умовах;
- лабораторних досліджень з метою встановлення взаємозв'язків між питомим електричним опором, твердістю та механічними характеристиками сталей;
- метрологічного аналізу одержаних результатів визначення границі плинності згідно із запропонованим методом.

#### 3.1. Розроблення експериментальної установки

Згідно із удосконаленим методом, для визначення границі плинності необхідно проводити вимірювання твердості та питомого електричного опору.

Виходячи з висновків, поданих в другому розділі, і з метою розроблення методики експериментальних досліджень для перевірки розробленого методу

контролю механічних характеристик сталей, необхідно використати існуючі, а також розробити технічні засоби, які дадуть можливість провести експериментальні дослідження щодо встановлення залежності між границею плинності та вибраними інформативними параметрами.

Структурна схема експериментальної установки для контролю границі плинності сталей згідно із розробленим методом зображена на рис. 3.1.

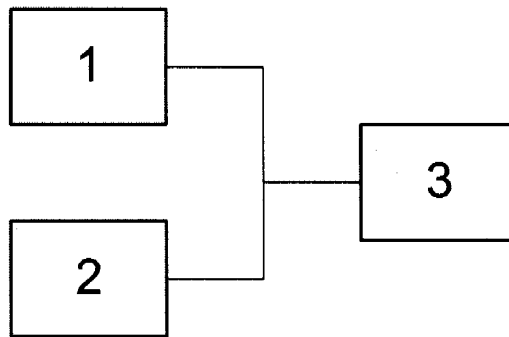


Рис.3.1. Структурна схема експериментальної установки для проведення лабораторних досліджень

Установка повинна складатись із блока вимірювання твердості 1 та блока вимірювання питомого електричного опору 2. Виміряні значення інформативних параметрів вводяться через клавіатуру в персональний комп'ютер 3 для розрахунку границі плинності.

Як вже зазначалося в другому розділі, блоком вимірювання твердості буде слугувати серійний динамічний твердомір типу ТД-32.

Як показали проведені в другому розділі теоретичні дослідження, блок вимірювання питомого електричного опору 2 повинен складатися з мікроомметра та чотиризондового вимірювального перетворювача. Чотиризондовий вимірювальний перетворювач необхідно розробити за результатами математичного моделювання в частині оптимального співвідношення лінійних розмірів системи зондів для досягнення високої чутливості методу.

На початкових етапах експериментальних досліджень контакт з об'єктом контролю здійснювався за допомогою використання двох зажимних струбцин,

при цьому сила вдавлювання контактних наконечників регулювалася за допомогою динамометричного ключа [94]. Проте такій реалізації контактного блоку були притаманні ряд недоліків. По-перше, вся операція щодо забезпечення контактування з ОК була досить тривалою і вимагала певних навичок в оператора, який здійснював контроль. По-друге, обов'язково повинен бути забезпечений двосторонній доступ до об'єкта контролю, що не давало можливості проводити вимірювання на реальних сталевих конструкціях.

Таким чином було розроблено і виготовлено чотиризондовий контактний механізм. Контактний механізм представляє собою два окремих контактори 1, 2 (рис.3.2,а), жорстко з'єднаних між собою зажимним фіксатором 3. В пластиковому корпусі кожного з контакторів міститься пара зондів-електродів - відповідно струмовий 4 та потенціальний 5. Зонди круглого перерізу зі загостреними кінцями виготовлені зі сталі 45 і загартовані. Діаметр кожного зонда становить 5 мм (рис.3.2,б). Підпружинення зондів дозволяє самовстановлюватись корпусу контакторів відносно досліджуваної поверхні з урахуванням її незначних нерівностей. Відстань між гострими кінцями пари зондів в кожному контакторі становить  $(10 \pm 0,1)$  мм. Контактори з'єднані таким чином, що кінці всіх зондів були розміщені вздовж прямої лінії, а також відстань між кінцями потенціальних контактів 5 становить  $(60 \pm 0,1)$  мм, що узгоджується з результатами математичного моделювання в частині оптимального співвідношення відстаней між зондами.

Загальний вигляд експериментальної установки для реалізації запропонованої методики зображено на рис.3.3.

До складу установки входить:

- вимірювальний блок 1 на базі атестованого мікроомметра БСЗ-010-2 (зав.№ 135) (спільна розробка "Самараенерго" та ФГУП "НИИЭМП", м. Пенза, Росія). Мікроомметр призначений для вимірювання малих значень активного електричного опору. Прилад дозволяє вимірювати опір на чотирьох діапазонах в однократному та багатократному режимах, проводити автокалібрування на зовнішніх еталонах (додаток Д);

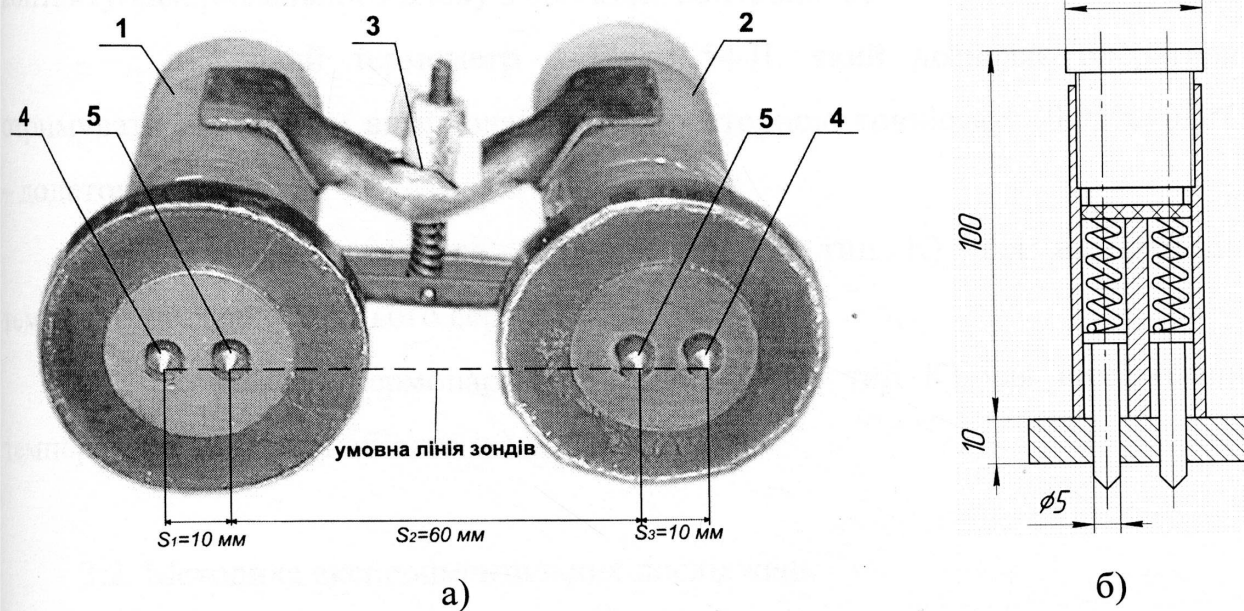


Рис.3.2. Загальний вигляд контактної механізми а) та окремого контактора з місцевими розрізами б)

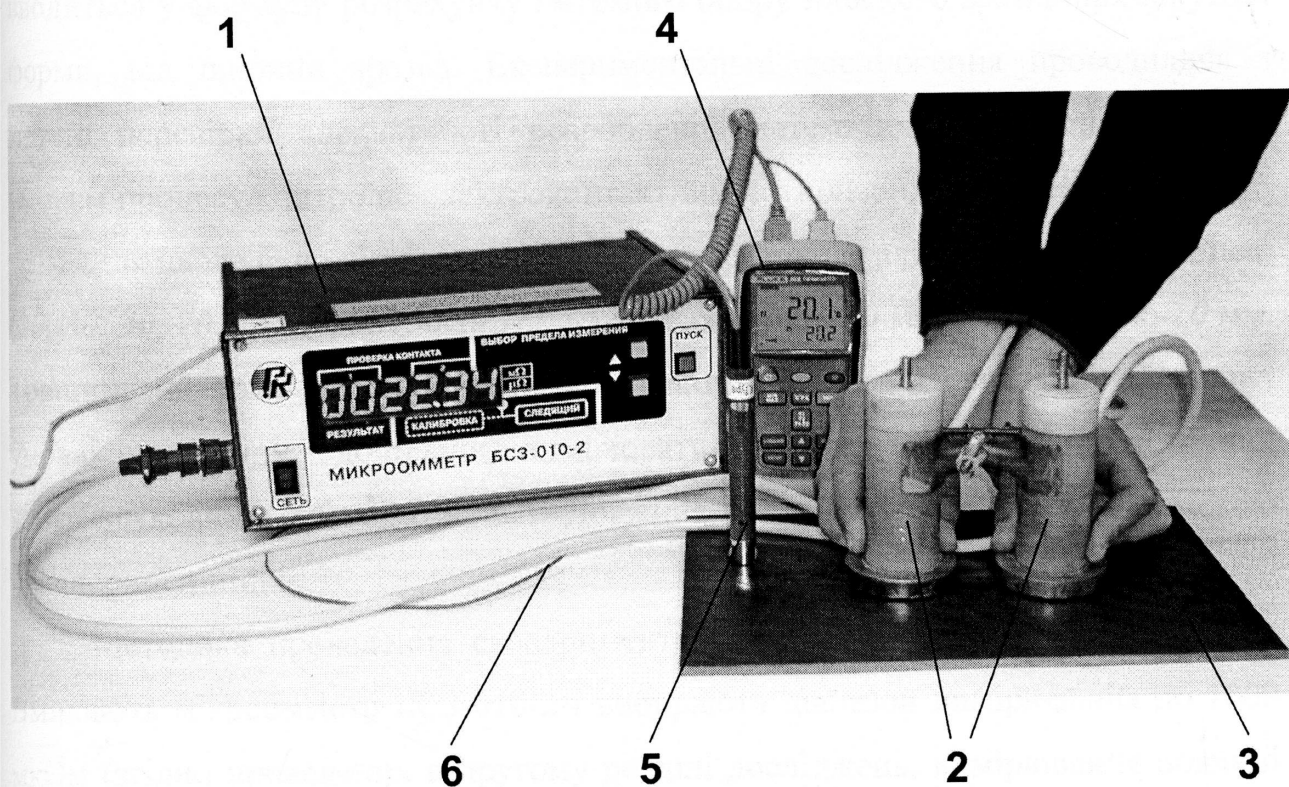


Рис.3.3. Загальний вигляд експериментальної установки

- розроблений контактний механізм 2 для встановлення електричного контакту вимірювального блоку з об'єктом контролю 3;
- цифровий термометр 4 Fluke 54-II, який дозволяє оперативно отримувати результати вимірювання з лабораторною точністю  $\pm (0.05\% + 0.3^\circ\text{C})$  - додток Е;
- точкова термопара 5 (серія NR-39, тип К) для вимірювання температури навколишнього середовища;
- контактна термопара 6 (серія NR-31В, тип К) для вимірювання температури поверхні об'єкта контролю 3.

### 3.2. Методика експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводилися в два етапи. Метою першого етапу стало встановлення залежності геометричної функції поправки, яка вводить у формулу розрахунку питомого опору плоского зразка прямокутної форми, від ширини зразка. Експериментальні дослідження проводилися з метою перевірки адекватності розробленої математичної моделі реальним мовам процесу контролю електроконтактним чотиризондовим методом.

Для цього 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. Товщину вимірювали за допомогою штангенциркуля. В реальних польових мовах товщину доцільно вимірювати за допомогою високоточних ультразвукових товщиномірів. Довжина вимірювалася за допомогою інженерної лінійки.

Методика проведення експериментальних досліджень була наступною. Змикають мікроомметр БСЗ-010-2 і вибирають діапазон вимірювання до 1000 мкОм (згідно проведених в другому розділі досліджень, вимірювання повинні проводитися в мікроомному режимі), прилад встановлюється в режим "перевірка контакту". На очищену від забруднень та зачищену до металічного блиску в місцях контакту зондів поверхню прикладають контактний механізм

по центрі зразка так, щоб лінія зондів була розміщена вздовж центральної лінії, паралельній довшій стороні зразка (рис.3.4). Оператор руками навантажує контактний механізм до моменту коли засвітяться верхні сегменти цифрового табло мікроомметра, що сигналізує про встановлення електричного контакту приладу з об'єктом контролю.

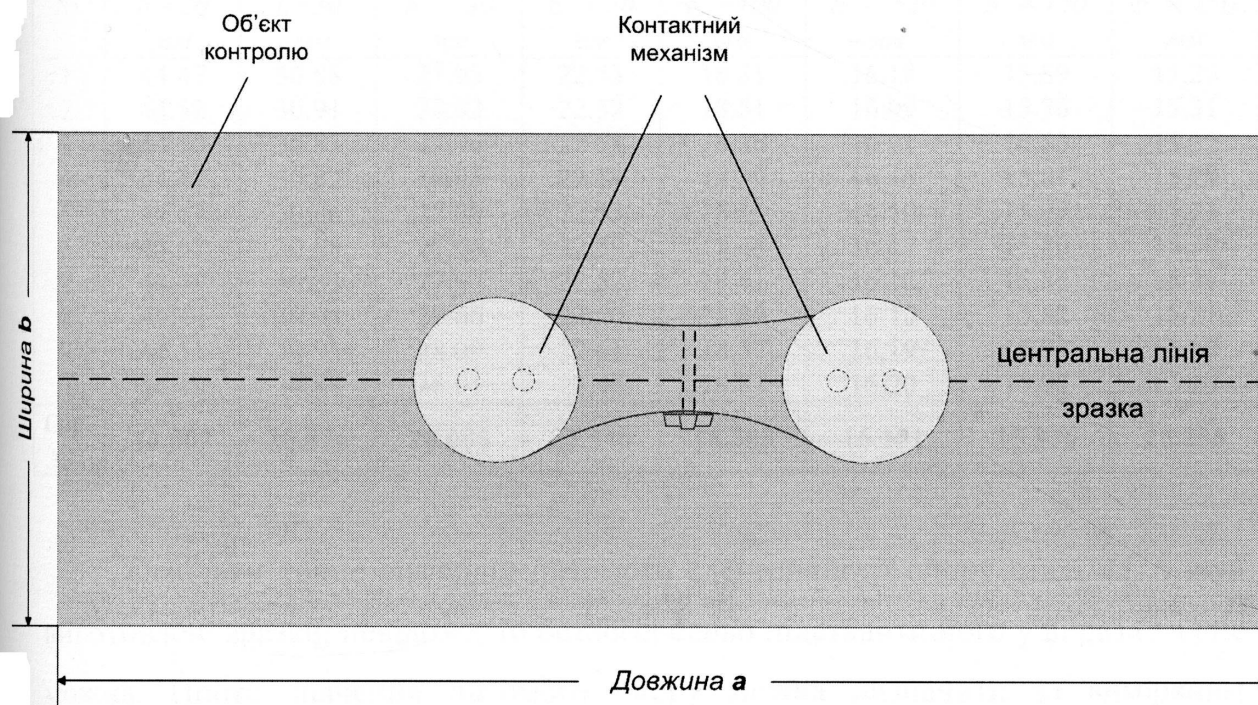


Рис.3.4. Схема розміщення контактної механізми на поверхні об'єкта контролю

Вимірювання проводилися за однакових умов при температурі  $20 \pm 0.3^\circ\text{C}$ , яка фіксувалася за допомогою цифрового термометра, оснащеного контактною термопарою. На кожному зразку виконано 10-кратні вимірювання електричного опору, значення якого відображається на цифровому табло мікроомметра БСЗ-010-2 (див. рис.3.2). Результати вимірювання електричного опору для всіх зразків наведено в табл. 3.1.

Після цього за середніми значеннями електричного опору  $R_i$  для кожного зразка було розраховано відповідні експериментальні значення геометричної функції поправки  $f_{експ,i}$ , яка визначається:

$$f_{\text{експ.}i} = \frac{\rho}{2\pi S \cdot R_i}, \quad (3.1)$$

де  $i$  – номер зразка.

Таблиця 3.1

**Значення електричного опору для зразків різної ширини**

№	Зразок 1 $b = 20$ мм	Зразок 2 $b = 30$ мм	Зразок 3 $b = 50$ мм	Зразок 4 $b = 70$ мм	Зразок 5 $b = 100$ мм	Зразок 6 $b = 120$ мм	Зразок 7 $b = 150$ мм	Зразок 8 $b = 180$ мм
1	44.47	30.88	27.95	22.53	18.31	16.18	15.89	15.29
2	44.52	30.91	28.02	22.52	18.51	16.09	15.76	15.31
3	44.50	30.83	27.96	22.58	18.36	16.21	15.80	15.32
4	44.41	30.82	28.03	22.54	18.39	16.15	15.81	15.29
5	44.57	30.84	28.00	22.53	18.33	16.10	15.77	15.23
6	44.52	30.88	27.96	22.59	18.44	16.17	15.80	15.30
7	44.59	30.83	27.97	22.52	18.41	16.12	15.85	15.31
8	44.44	30.94	28.06	22.50	18.40	16.10	15.82	15.21
9	44.51	30.95	28.09	22.61	18.37	16.19	15.94	15.27
10	44.49	30.88	28.01	22.48	18.31	16.20	15.92	15.29
Сер. зн.	<b>44.502</b>	<b>30.876</b>	<b>28.005</b>	<b>22.540</b>	<b>18.383</b>	<b>16.151</b>	<b>15.836</b>	<b>15.253</b>

Оскільки точне значення питомого електричного опору сталі 45, з якої виготовлені зразки, невідоме, то безпосередньо підставити його у вираз (3.1) не можна. Проте значення питомого опору можна визначити за виміряним середнім значенням опору  $R_{180}$  та розрахованим за виразом (2.27) теоретичним значенням геометричної функції поправки  $f_{\text{теор.}180}$  для найбільшого зразка шириною 180 мм:

$$\rho = 2\pi S \cdot R_{180} \cdot f_{\text{теор.}180}. \quad (3.2)$$

Підставляючи вираз (3.2) у (3.1), отримуємо:

$$f_{\text{експ.}i} = \frac{R_{180} \cdot f_{\text{теор.}180}}{R_i}. \quad (3.3)$$

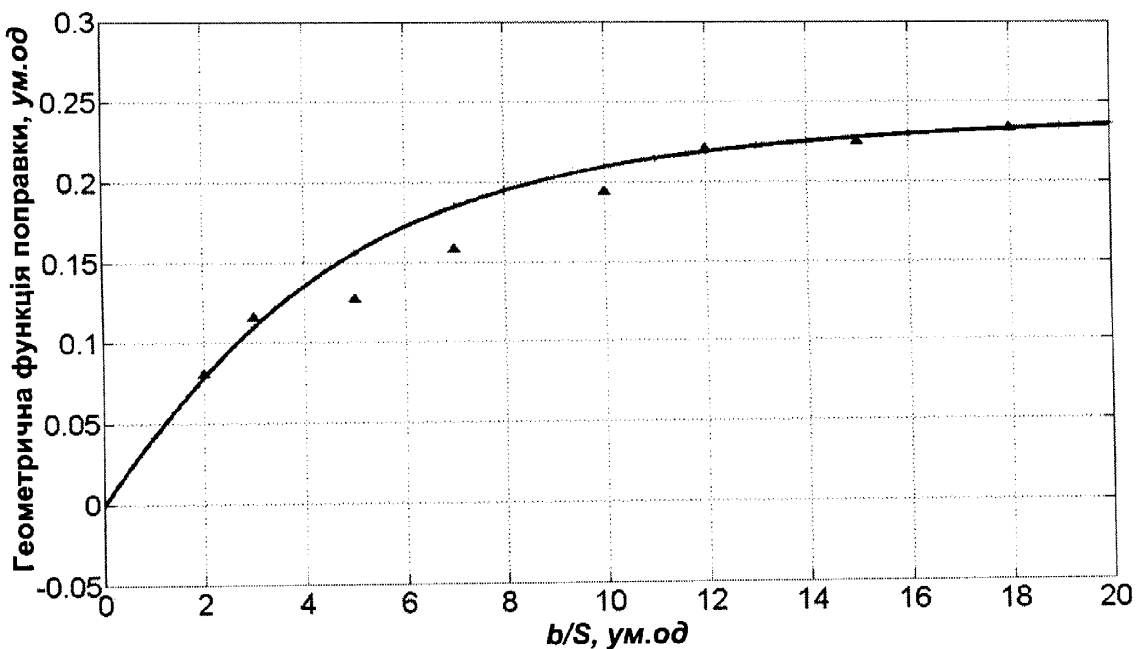
Результати розрахованих теоретичних (2.27) та експериментальних (3.3) значень геометричної функції поправки для всіх зразків наведено в табл. 3.2.



**Результати розрахунку експериментальних і теоретичних значень  
геометричних функцій поправок**

№	Геометричні параметри зразків			$f_{\text{теор.і.}}, \text{ ум.од}$	$R_i, \text{ мкОм}$	$f_{\text{експ.і.}}, \text{ ум.од}$
	a/S	h/S	b/S			
1	28	1	2	0.0792	44.502	0.0801
2			3	0.1103	30.876	0.1154
3			5	0.1561	28.005	0.1273
4			7	0.1850	22.540	0.1581
5			10	0.2097	18.383	0.1939
6			12	0.2195	16.151	0.2207
7			15	0.2283	15.836	0.2251
8			18	0.2337	15.253	0.2337

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі процесу контролю питомого опору електроконтактним чотиризондовим методом було виконано співставлення результатів розрахунку геометричної функції поправки, одержаних експериментально та теоретично (рис.3.5).



▲ - експериментальні дані; — - теоретичні дані за (2.43)

Рис.3.5. Залежність геометричної функції поправки від ширини зразків

Як бачимо з рис. 3.5, отримані експериментальним шляхом значення геометричної функції поправки в цілому повторюють теоретичну криву. Певне розходження в теоретичних та експериментальних даних для зразків шириною 50, 70 та 100 мм можна пояснити певним відхиленням форми зразків від прямокутної, що виникло під час їх виготовлення. Дане відхилення форми суттєво впливає на результати вимірювання для зразків невеликої ширини.

Таким чином, можна стверджувати, що розроблена математична модель є адекватною реальному процесу контролю питомого опору чотиризондовим методом при вибраному співвідношенні відстаней між зондами-електродами.

Метою другого етапу експериментальних досліджень стало встановлення залежності між границею плинності та питомим електричним опором для експериментальної перевірки удосконаленого методу контролю механічних характеристик сталей.

Методика проведення експериментальних досліджень щодо визначення механічних характеристик сталей була наступною. Було відібрано 14 плоских повнорозмірних зразків конструкційних сталей. На кожному зразку необхідно провести 10-кратні вимірювання твердості за шкалою Брінеля та електричного опору розробленою експериментальною установкою (див. рис.3.3). З метою встановлення можливості вимірювання твердості поративними динамічними твердомірами, необхідно провести порівняльні дослідження твердості поративними і стаціонарним твердомірами. З метою визначення дійсних значень границі плинності необхідно провести руйнівні випробування на випробувальній машині. Результати описаних експериментальних досліджень наведено в наступному підрозділі.

### 3.3. Результати експериментальних досліджень

З метою встановлення залежності між границею плинності та комплексом інформативних параметрів (питомим електричним опором і твердістю) було проведено експериментальні дослідження на зразках сталей, що

використовуються в металоконструкціях нафтогазової промисловості. Адже відомо, що механічні характеристики металоконструкцій у ході тривалої експлуатації, враховуючи сукупний вплив різних умов та чинників, змінюються внаслідок деградації металу.

Згідно розробленої методики було відібрано 14 плоских повнорозмірних зразків конструкційних сталей прямокутної форми.

### 3.3.1. Порівняльні дослідження портативних і стаціонарного твердомірів

У ході вимірювання портативними динамічними твердомірами, пред'являються вимоги як до якості та чистоти поверхні, так і до маси об'єкту контролю. Дані вимоги виробники вказують в експлуатаційній документації на прилад. В реальних польових умовах можливі деякі відхилення від вказаних вимог, що може призвести до виникнення похибок вимірювання.

З метою перевірки можливості застосування портативних твердомірів в реальних умовах, було проведено порівняльні дослідження на відібраних зразках динамічним і стаціонарним твердомірами. Співставлення результатів контролю твердості руйнівним і неруйнівним методами надасть підстави судити про адекватність застосування динамічних твердомірів в польових умовах і можливість їх використання в експериментальних дослідженнях.

Руйнівні випробування для визначення твердості сталених зразків проводилися згідно ГОСТ 9012 [95]. В дослідженнях використовувався стаціонарний твердомір ТШ-2М (зав.№1154, 1974 р.вип.). Умови проведення експериментальних досліджень були наступними: навантаження – 3 тони, діаметр кульки – 10 мм, витримка – 10 с. За діаметром відбитка зі спеціальних таблиць вибирають відповідне значення твердості по шкалі Брінеля.

На кожному зразку проводили по три вимірювання твердості [95]. Для порівняльних досліджень були використані портативні ультразвуковий контактнo-резонансний твердомір ТКР-35 (фірма “Ультракoн-Сервіс”, м.Київ)

та динамічний твердомір типу ТД-32 (фірма “Ультракон”, м.Київ) – рис.3.6. На кожному зразку проводилися 10-кратні вимірювання.



Рис.3.6. Використані в експериментальних дослідженнях твердоміри:

а) – ТД-32; б) – ТКР-35; в) ТШ-2М

Осереднені результати вимірювання портативними та стаціонарним твердомірами представлено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

**Результати порівняльних досліджень твердості портативними та стаціонарним твердомірами**

Позначення зразка	Твердомір ТД-32	Твердомір ТКР-35	Твердомір ТШ-2М
1П	141.5	135	134
2П	114.9	114,3	119
3П	122.2	116	125
4П	175.6	136,6	159
5П	123.2	138,3	121
7П	133.1	134,6	126
8П	139.2	126,3	130
9П	160.6	134	153
1Т	184.2	149	163
5Т	168.7	151	158
8Т	215.2	187	225
10Т	234.8	198.3	235
12Т	221.2	188.3	208
21Т	218.6	203	209

На рис. 3.7, 3.8 зображено графіки залежностей твердості, виміряними відповідно твердомірами ТД-32 і ТКР-35 від дійсних значень твердості, визначеної стаціонарним твердоміром ТШ-2М. Також на рисунках зображено лінії апроксимації.

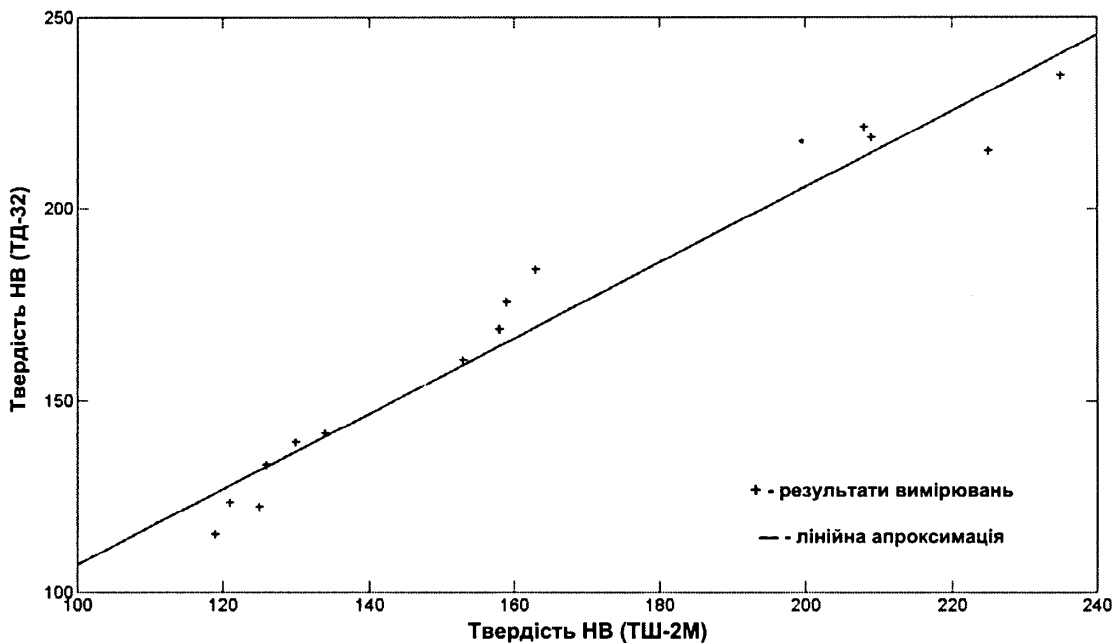


Рис.3.7. Залежність показів твердоміра ТД-32 від твердості, визначеної ТШ-2М

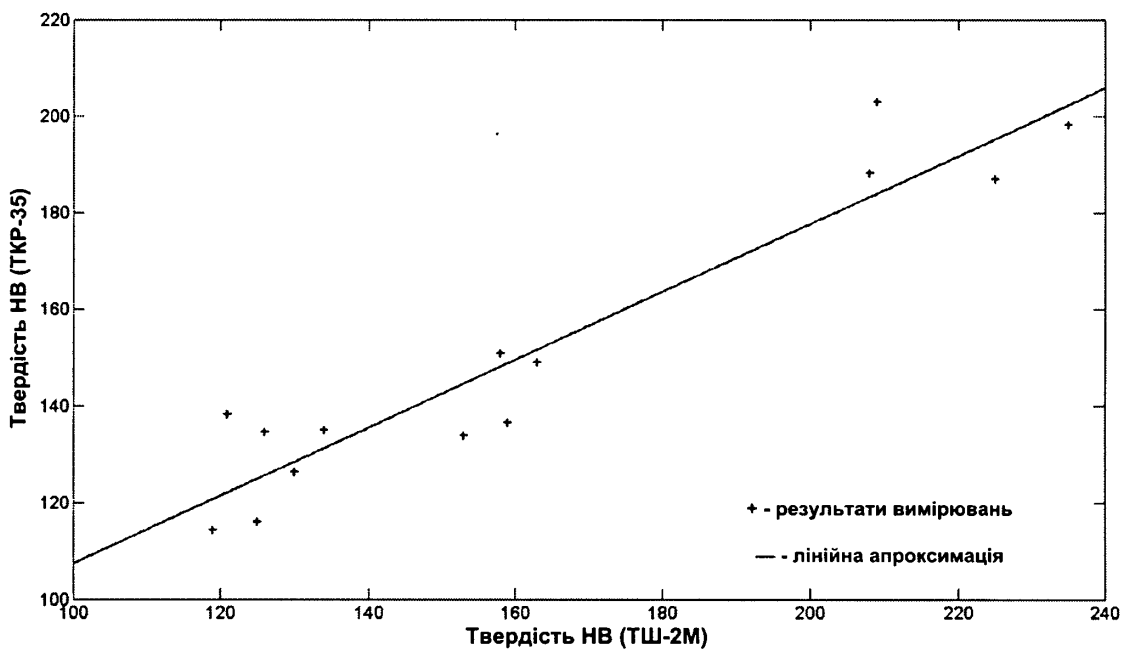


Рис.3.8. Залежність показів твердоміра ТКР-35 від твердості, визначеної ТШ-2М

Параметри апроксимації були наступними:

1) залежність показів твердоміра ТД-32 від твердості, визначеної ТШ-2М, апроксимована функцією вигляду  $f(x) = a \cdot x + b$ , де  $a=0.987$ ,  $b=8.257$ . Середнє квадратичне відхилення (СКВ) апроксимації – 8.776 НВ. Коефіцієнт кореляції становить 0.979;

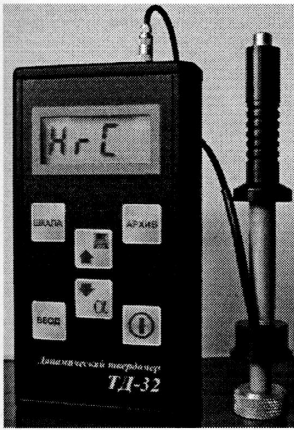
2) залежність показів твердоміра ТКР-35 від твердості, визначеної ТШ-2М, апроксимована функцією вигляду  $f(x) = a \cdot x + b$ , де  $a=0.704$ ,  $b=36.958$ . Середнє квадратичне відхилення (СКВ) апроксимації – 10.12 НВ. Коефіцієнт кореляції становить 0.947.

Вигляди функцій апроксимації носять лінійний характер. За значеннями СКВ та коефіцієнтів кореляції можна зробити висновок, що найкраще апроксимовані покази твердоміра ТД-32 від твердості, визначеної руйнівним методом з допомогою стаціонарного твердоміра ТШ-2М. Значний розкид показів твердоміра ТКР-35 зумовлений, в першу чергу, специфікою контролю, яка вимагає досконалих навичок оператора з приладом.

Аналізуючи одержані результати досліджень можна стверджувати, що в польових умовах можна використовувати динамічний твердомір типу ТД-32, оскільки його покази в цілому співпадають з фактичними значеннями твердості. Це підтверджує правильність вибору даного приладу для проведення експериментальних досліджень щодо встановлення залежності границі плинності від досліджуваних параметрів.

3.3.2. Лабораторні дослідження механічних характеристик сталей розробленим методом

З метою встановлення залежності границі плинності від комплексу інформативних параметрів було проведено на кожному зразку 10-кратні вимірювання твердості за шкалою Брінеля динамічним твердоміром ТД-32 та електричного опору розробленою експериментальною установкою (рис.3.9).



а)



б)

Рис.3.9. Використані в ході досліджень технічні засоби:

а) – твердомір ТД-32; б) – експериментальна установка

На очищену від забруднень та механічно зачищену в місці контакту зондів і щупа твердоміра поверхню об'єкта контролю прикладають контактний механізм. При цьому вимірювальний перетворювач розміщують по центрі зразка, лінія зондів розміщена вздовж центральної лінії (див. рис.3.4), паралельній довшій стороні зразка. Співвідношення геометричних розмірів зразків до відстані  $S$  між струмовим і потенціальним зондами контакторів приведено в табл.3.4 (колонки 2-4).

Порядок і умови проведення вимірювання відповідають розробленій методиці (п.3.2). Вимірювання проводилися за однакових умов при температурі  $20 \pm 0.3^\circ\text{C}$ . Розрахунок геометричних функцій поправок і питомого електричного опору кожного зразка здійснювався відповідно за формулами (2.27) та (2.28).

Границя плинності була визначена шляхом проведення випробувань на розрив на атестованій розривній машині ГМС-50 (зав.№7803) згідно ГОСТ 1497 [96]. З цією метою з усіх повно розмірних сталевих зразків було вирізано стандартні пропорційні зразки, розміри яких визначені стандартом [96] – рис.3.10.

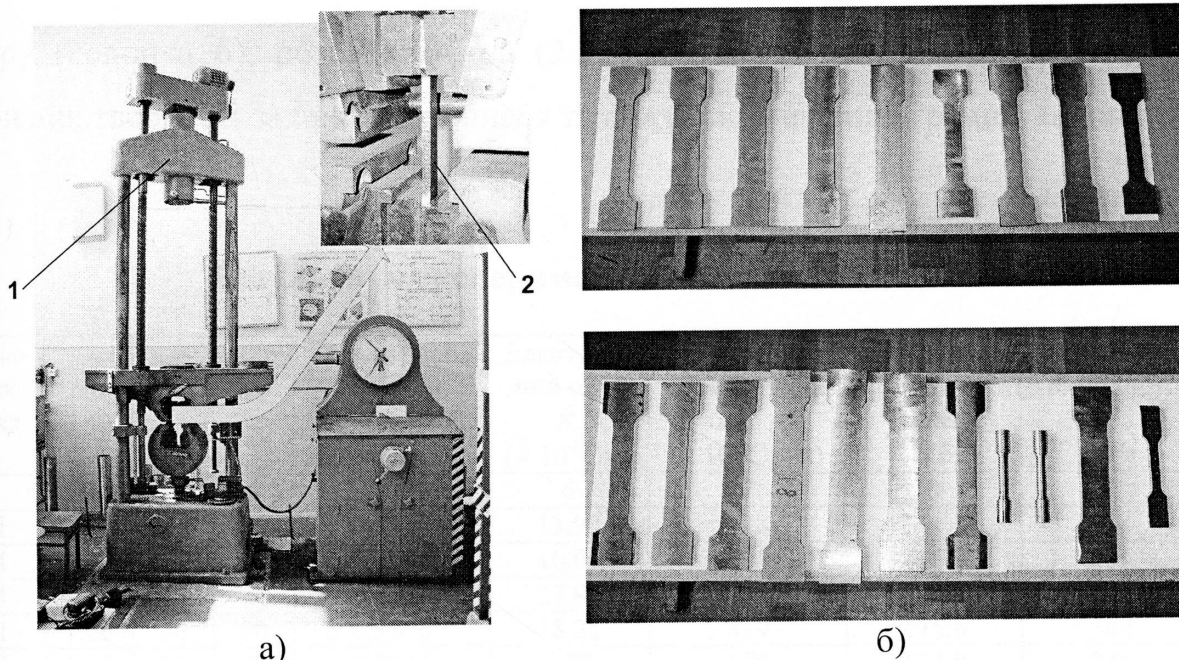


Рис.3.10. Випробування пропорційних зразків на статичний розрив:

а) – розривна машина ГМС-50 (1) із закріпленим зразком (2);

б) – загальний вигляд пропорційних зразків

Границя плинності визначається за явно вираженої зупинки стрілки індикатора силового вимірювального пристрою випробувальної машини, проградуєваному в одиницях навантаження в тонах. Одночасно знімається діаграма розтягу, яка рисується в реальному режимі самописцем на міліметровому папері. Копії таких діаграм наведено в додатку Ж.

Границя плинності розраховується за формулою:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0},$$

де  $P_T$  - навантаження, яке відповідає границі плинності [96];

$F_0$  - початкова площа поперечного перерізу робочої частини зразка.

В результаті руйнівних випробувань отримано діапазон значень границі плинності відібраних зразків – 238-492 МПа.

В табл. 3.4 наведено осереднені результати експериментальних досліджень на кожному зразку, а саме розраховані за (2.27) значення геометричної функції поправки (колонка 5), значення активного електричного



опору (колонка 6), розраховані за (2.26) значення питомого опору, середні значення твердості за шкалою Брінеля та фактичні значення границі плинності.

Таблиця 3.4

### Результати експериментальних досліджень

Позначення зразка	$h/S$	$a/S$	$b/S$	Геометрична функція поправки $f$ , ум.од	Електричний опір $R$ , ( $\times 10^{-6}$ Ом)	Питомий електричний опір $\rho$ ( $\times 10^{-9}$ Ом·м)	Твердість за шкалою Брінеля $HB$	Границя плинності $\sigma_T$ , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1П	1	34.6	9	0.2037	13.97	178	141.5	238
2П	1.42	35	19.5	0.3156	10.00	198	114.9	251
3П	1.47	33	3	0.1523	27.97	267	122.2	253
4П	1.26	30	20	0.2870	18.25	329	175.6	349
5П	1.63	30	16.4	0.3416	7.72	165	123.2	246
7П	0.83	30	19.6	0.1990	11.28	141	133.1	294
8П	1.17	30	19.7	0.2703	10.15	172	139.2	268
9П	0.5	30	19.5	0.1216	22.54	172	160.6	269
1Т	0.7	40	27.6	0.1737	33.47	370	184.2	384
5Т	0.85	39.5	7.4	0.1638	21.83	224	168.7	294
8Т	1.1	40	5	0.1703	35.66	380	215.2	470
10Т	1.17	40	6.5	0.2059	24.36	315	234.8	392
12Т	1.88	40.3	18.4	0.3805	16.75	398	221.2	472
21Т	1.65	28	16.2	0.3436	18.92	411	218.6	492

Наступним етапом стало проведення графічного та кореляційного аналізу з метою встановлення характеру залежності границі плинності сталей від інформативних параметрів (питомого електричного опору та твердості). На рисунках 3.11, 3.12 зображено графіки залежностей границі плинності від твердості та питомого електричного опору відповідно. Також на рисунках зображено криві апроксимації.

Параметри апроксимації були наступними:

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 – 40.45 МПа. Коефіцієнт кореляції між границею плинності та твердістю 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 – 71.51 МПа. Коефіцієнт кореляції між границею плинності та питомим електричним опором становить 0.69.

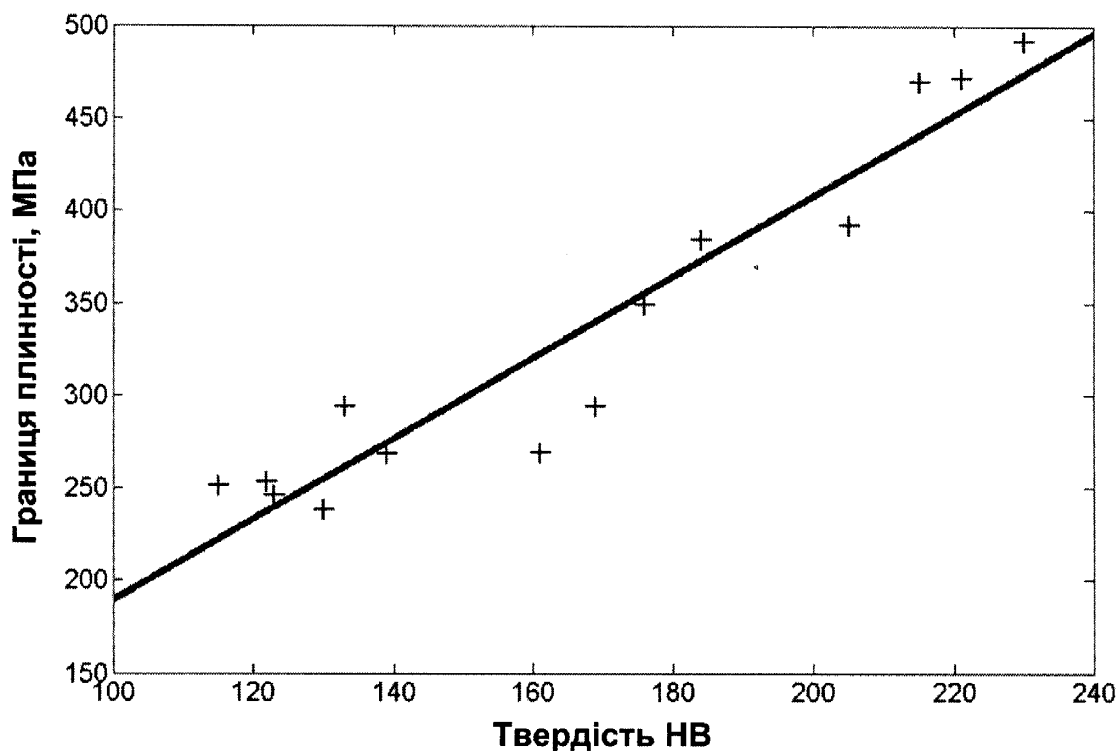


Рис. 3.11. Залежність границі плинності від твердості

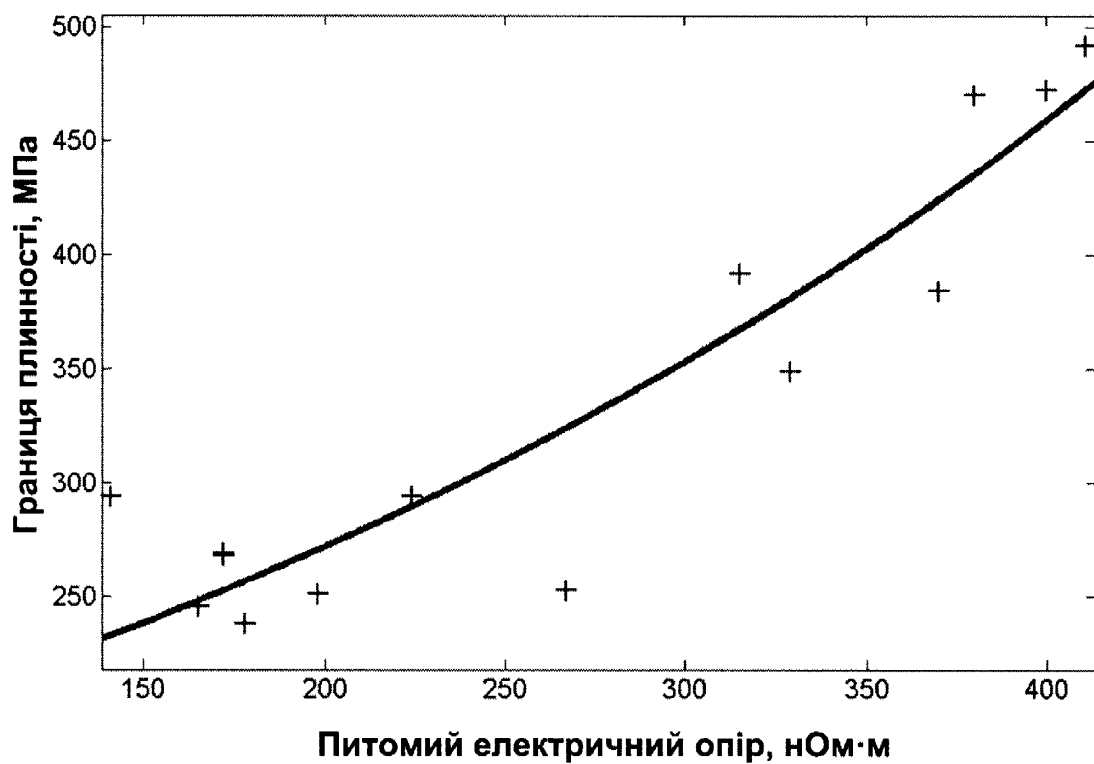


Рис. 3.12. Залежність границі плинності від питомого електричного опору

Види функцій апроксимації зображених вище залежностей, окрім випадку твердості, носять нелінійний характер [97]. Крім того, залежності границі плинності від інформативних параметрів носять прямо пропорційний характер, що узгоджується із раніше встановленими теоретично кореляційними залежностями [73]. Теоретичне значення коефіцієнту кореляції між питомим електричним опором та границею плинності для феритно-перлітних (дулексних) сталей (матеріал труб нафтогазового сортаменту) становить 0.76 (експериментальні значення коефіцієнту кореляції 0.69).

Враховуючи те, що коефіцієнти кореляції вказують на нелінійний характер залежності границі плинності від твердості та питомого електричного опору, то є доцільним апроксимувати границю плинності, враховуючи твердість та питомий електричний опір у комплексі. Як вже зазначалось, таку задачу успішно можуть вирішувати сучасні алгоритми ШНМ.

Нейронна мережа заданої будови тренувалась для розв'язання задачі апроксимації границі плинності як функції двох вимірюваних параметрів - твердості та питомого електричного опору. 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 був розділений на дві групи:

- *тренувальна* – результати вимірювань на 11 зразках використовувались для тренування нейронних мереж. При цьому для кожного зразка вибиралися по десять вимірюваних 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 використовувались 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). Тренувальним алгоритмом, як і в другому розділі, в усіх мережах слугував алгоритм Левенберга-Марквардта, який використовується для тренування невеликих мереж і характеризується швидким сходженням.

Найкраще здатною до апроксимації границі плинності від комплексу вхідних параметрів виявилася ШНМ з архітектурою 10x1. Результати тестування нейронної мережі наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

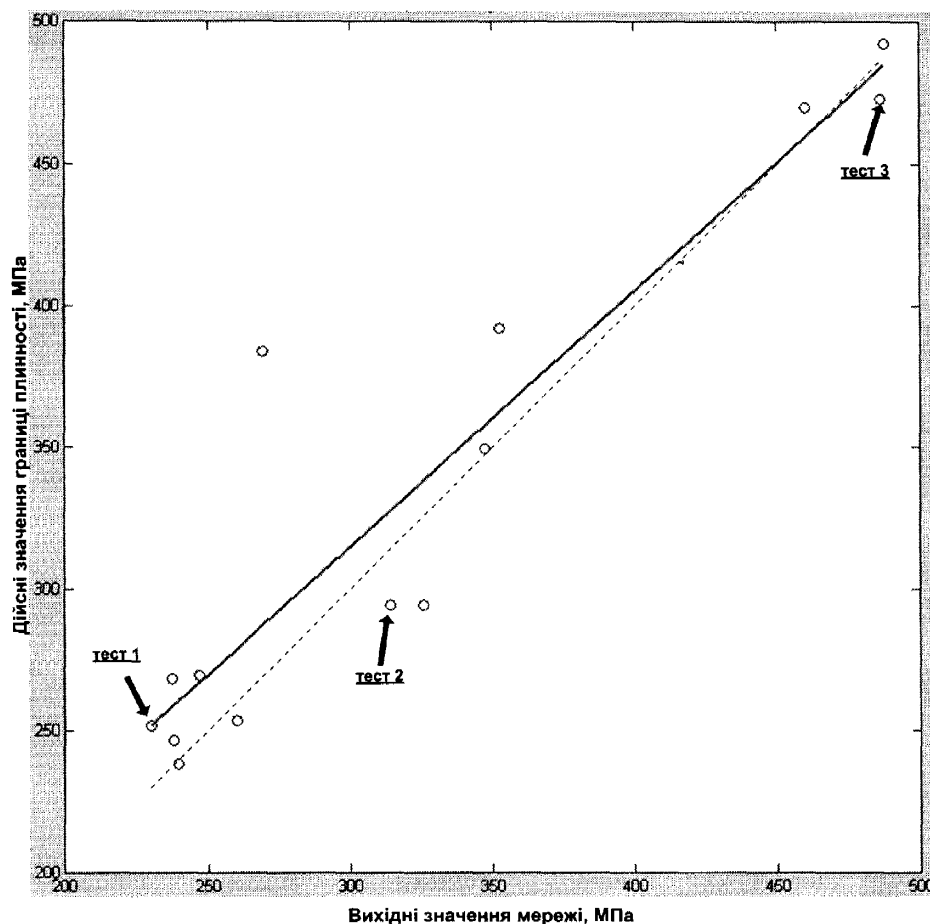
### Результати тестування нейронної мережі

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

**Примітка.** Виділені тестові значення границі плинності належать зразкам, вхідні параметри яких не використовувалися у ході тренування мережі

Для оцінювання точності роботи мережі проведемо регресійний аналіз в програмному середовищі *MathLab 2006b* за допомогою функції **postreg (t, x)**, де  $t$  – цільовий вектор,  $x$  – вихідний вектор мережі. Дана функція порівнює

вихідний масив мережі з цільовим (рис.3.13). Вихідним аргументом цієї функції є коефіцієнт кореляції, який в нашому випадку рівний  $R=0.929$ .



o – вихідні значення мережі; - - - - пряма для ідеального випадку ( $R=1$ ); — - лінія регресії для вихідного вектору мережі ( $R=0.929$ )

Рис. 3.13. Розкид вихідних значень мережі відносно лінії регресії

На рис.3.13 стрілками вказано на вихідні значення мережі для зразків, які не використовувалися у ході тренування.

Таким чином, за результатами виконаних експериментальних досліджень можемо стверджувати, що комплекс параметрів твердість та питомий електричний опір [98] можуть бути використані для визначення границі плинності конструкційних сталей. Ці результати також підтверджують раніше одержані теоретичні висновки щодо вибору інформативних параметрів контролю [73].

### 3.4. Метрологічна оцінка розробленого методу контролю

Для запропонованого у другому розділі роботи методу визначення механічних характеристик сталей важливим питанням є проведення метрологічної оцінки, яка надасть підставу зі врахуванням умов проведення контролю та практичної реалізації розробленого методу, а також вимог щодо точності отриманих результатів використати даний метод.

З цією метою необхідно провести метрологічну оцінку одержаних в третьому розділі результатів опосередкованого вимірювання питомого електричного опору, а також багатократних опосередкованих вимірювань границі плинності.

#### 3.4.1. Аналіз похибки опосередкованого вимірювання питомого електричного опору чотиризондовим методом

Як було показано в попередніх розділах, вимірювання питомого електричного опору чотиризондовим методом належить до опосередкованих вимірювань. Це означає, що для аналізу похибки розрахунку питомого електричного опору необхідно враховувати похибки всіх складових, що входять у вирази (2.26), (2.27).

Слід зазначити, що похибка опосередкованого вимірювання питомого опору визначається крім складових похибок, що входять у формулу розрахунку, також іншими чинниками. До них належать:

- 1) розміри контактних площадок зондів;
- 2) опір контактів та перехідні контактні опори;
- 3) нестабільність температури об'єкту контролю тощо.

У випадку коли контакт не є точковим, тобто коли контактна площадка є кінцевих розмірів, тоді в результати вимірювань вноситься систематична похибка. Дана похибка залежить від  $\left(\frac{r_0}{S}\right)^2$  і вона є відмінною для струмових і

потенціальних контактів. На практиці цією похибкою можна знехтувати, якщо відношення  $r_0/S < 0.05$  ( $r_0$  - радіус контактної площадки) [68]. Оскільки для розробленої конструкції вимірювального перетворювача  $S = 10\text{мм}$ , і діаметр площадки у ході вимірювань не перевищував  $1\text{мм}$ , то умова нехтування систематичною похибкою виконується.

Як було показано в другому розділі, вимірювач напруги мікроомметра БСЗ-010-2 має високий вхідний опір, тому в даному випадку струм через вимірювальні зонди є мізерним. З огляду на це, опір контактів та перехідні опори не впливають на результати вимірювання.

Відомо, що питомий опір є температурно залежною характеристикою. Тому будь-яка зміна температури об'єкта контролю призводить до зміни величини вимірюваного питомого електричного опору. Проте, вимірюючи температуру поверхні об'єкта контролю за допомогою високоточних цифрових термометрів, не представляє труднощів внести поправку і привести вимірне значення питомого опору за нормальних умов.

Розрахунок абсолютної похибки опосередкованого вимірювання питомого опору доцільно здійснювати диференціальним методом через часткові похідні по аргументах залежності (2.26) з підставленим в неї виразом (2.27) для розрахунку геометричної функції поправки. Тоді

$$\Delta\rho = \frac{\partial\rho}{\partial\pi}\Delta\pi + \frac{\partial\rho}{\partial S}\Delta S + \frac{\partial\rho}{\partial R}\Delta R + \frac{\partial\rho}{\partial t}\Delta t + \frac{\partial\rho}{\partial h}\Delta h + \frac{\partial\rho}{\partial a}\Delta a + \frac{\partial\rho}{\partial b}\Delta b, \quad (3.4)$$

Похибкою  $\Delta\pi$  задання числа  $\pi$  можна знехтувати, оскільки в програмному забезпеченні, за допомогою якого розраховують значення питомого опору, дане число задається з високою точністю.

Слід зазначити, що одержання часткових похідних  $\frac{\partial\rho}{\partial t}\Delta t$ ,  $\frac{\partial\rho}{\partial h}\Delta h$ ,  $\frac{\partial\rho}{\partial a}\Delta a$ ,  $\frac{\partial\rho}{\partial b}\Delta b$  в аналітичному виді представляється важко вирішуваною задачею через складний вираз (2.27) для геометричної функції поправки. Таким чином вираз (3.4) доцільно записати так:

$$\Delta\rho = \frac{\partial\rho}{\partial S} \Delta S + \frac{\partial\rho}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial\rho}{\partial f} \Delta f. \quad (3.5)$$

Після знаходження часткових похідних вираз (3.5) буде таким:

$$\Delta\rho = 2\pi(R \cdot f \cdot \Delta S + S \cdot f \cdot \Delta R + S \cdot R \cdot \Delta f). \quad (3.6)$$

Як відомо, теоретично задана відстань  $S$  між струмовим і потенціальним зондами становить 10 мм. Конструктивна похибка, яка зумовлена неточністю виготовлення контакторів становить не більше  $\Delta S = \pm 0.1 \text{ мм}$ .

В технічному паспорті на мікро омметр БСЗ-010-2 встановлена основна відносна похибка приладу приведена до діапазону 1000 мкОм, яка становить не більше  $\pm 0.05 \dots 0.1\%$ . Таким чином абсолютна похибка вимірювання електричного опору в мікро-омному діапазоні становить  $\Delta R = \pm 0.5 \text{ мкОм}$ .

Абсолютну похибку  $\Delta f$  розрахунку геометричної функції поправки можна визначити чисельним експериментом, змінюючи встановлене ( $m$ ,  $S$ ) чи вимірне ( $h$ ,  $a$ ,  $b$ ) значення кожного аргументу, що входить у вираз (2.27) на гранично допустиме значення абсолютної похибки кожного з аргументів. Відомо, що  $m = S_2 / S = 6$ .

Тоді відповідна абсолютна похибка задання числа  $m$  може бути розрахована так:

$$\Delta m = \sqrt{\left(\frac{1}{S}\right)^2 (\Delta S_2)^2 + \left(\frac{-S_2}{S^2}\right)^2 (\Delta S)^2}; \quad (3.7)$$

Конструктивна похибка, зумовлена неточністю вимірювання відстані між потенціальними контактами,  $\Delta S_2 = \pm 0.5 \text{ мм}$ . Похибка вимірювання товщини плоского зразка  $\Delta h = \pm 0.05 \text{ мм}$ . Похибки вимірювання довжини та ширини зразка  $\Delta a = \Delta b = \pm 0.5 \text{ мм}$ . Таким чином, абсолютні похибки розрахунку геометричної функції поправки для кожного зразка, визначені в результаті чисельного експерименту, наведено в табл. 3.6. Також в табл. 3.6 наведено результати розрахунку за (3.6) абсолютних похибок опосередкованого вимірювання питомого електричного опору на кожному зразку.



### Абсолютні похибки вимірювання питомого електричного опору

Позначення зразка	$\Delta f$ , ум.од	$\Delta \rho$ , нОм·м
1П	0.0025	10.38
2П	0.0033	13.97
3П	0.0012	9.57
4П	0.0024	14.06
5П	0.0036	14.13
7П	0.0019	9.01
8П	0.0028	12.00
9П	0.0007	6.53
1Т	0.0013	12.33
5Т	0.0019	10.00
8Т	0.0021	12.44
10Т	0.0026	13.60
12Т	0.0023	13.50
21Т	0.0023	13.51

Як видно з табл. 3.6 значення абсолютної похибки вимірювання питомого електричного опору знаходиться в межах 6.53-14.13 нОм·м. Враховуючи максимальне значення абсолютної похибки (14.13 нОм·м), знаходимо приведену до діапазону вимірювання (250 нОм·м) відносну похибку, яка не перевищує 5.6%.

3.4.2. Аналіз похибки опосередкованого визначення границі плинності сталей

У попередніх підрозділах було розроблено та експериментально перевірено метод контролю границі плинності сталей, який базується на

комплексному врахуванні двох інформативних параметрів (питомого електричного опору та твердості) із використанням алгоритмів штучних нейронних мереж.

Вимірювання твердості сталей здійснюється за допомогою серійного твердоміра динамічного ТД-32. Для вимірювання питомого електричного опору та оброблення вимірної інформації згідно з удосконаленим методом було розроблено експериментальну установку, призначену для контролю питомого опору електроконтактним чотиризондовим методом і оброблення результатів вимірювань твердості та питомого електричного опору за допомогою алгоритмів штучних нейронних мереж.

Визначення границі плинності згідно з розробленим методом відноситься до опосередкованих вимірювань. Тому було вирішено здійснити метрологічну оцінку результатів опосередкованих вимірювань границі плинності сталей з допомогою розробленої експериментальної установки в ході опосередкованих вимірювань з багатократними спостереженнями аргументів.

Для цього було використано методику метрологічної оцінки результатів вимірювань інформаційно-вимірювальних систем, побудованих на базі алгоритмів штучних нейронних мереж [99].

У п.3.2 описана методика проведення експериментальних досліджень на сталених зразках, результати яких наведено у п.3.3 (див. табл.3.4). Тестування роботи натренованої нейромережі проведено на трьох тестових сталених зразках. Оскільки відомо, що згідно методики експериментальних досліджень було виконано 10-кратні вимірювання питомого опору і твердості на зразках, то було проведено метрологічну оцінку результатів власне цих багатократних спостережень.

Результати 10-кратних вимірювань твердості та питомого електричного опору та відповідні їм розраховані за допомогою нейронної мережі значення границі плинності для трьох тестових сталених зразків вказані в табл.3.7.

## Результати багатократних вимірювань

№	Тестовий зразок №1 (2П) $\sigma_T = 251,8 \text{ МПа}$			Тестовий зразок №2 (7П) $\sigma_T = 294,3 \text{ МПа}$			Тестовий зразок №3 (12Т) $\sigma_T = 470 \text{ МПа}$		
	<i>HV</i>	$\rho$	$\sigma_T$	<i>HV</i>	$\rho$	$\sigma_T$	<i>HV</i>	$\rho$	$\sigma_T$
1	114	197,9	230,05	127	140,8	315,79	219	280,7	492,56
2	105	198,1	230,00	124	141,3	313,43	227	281,2	480,05
3	107	197,5	230,00	139	140,8	325,73	223	280,9	490,96
4	108	197,9	230,00	127	141,3	314,83	210	281,6	478,85
5	127	197,5	237,03	128	140,9	315,03	217	282,1	491,48
6	117	199,7	230,99	140	141,3	330,28	226	279,5	485,57
7	119	197,1	230,98	129	141,5	302,89	215	280,7	489,83
8	110	199,5	230,00	134	140,5	314,90	212	281,2	484,55
9	117	199,5	230,88	133	141,4	314,51	229	280,9	468,10
10	119	198,5	231,94	125	141,2	301,37	221	281,2	492,31

Оброблення одержаних результатів було виконано відповідно до стандартної методики [100]. Розглянемо дану методику для тестового зразка №1.

В попередніх підрозділах було зазначено, що перед тренуванням та тестуванням проводилося нормування вхідних даних:

$$ro = (\rho - \min\rho) / D_{\rho}, \quad (3.8)$$

де  $\rho$  – вимірне значення питомого електричного опору;

$ro$  – підготовлене значення;

$\min\rho$  – мінімальне значення питомого опору;

$D_{\rho}$  – діапазон значень питомого опору.

Аналогічно проводиться підготовка значень твердості та границі лийності. Таким чином операції будуть проводитися із підготовленими (нормованими) значеннями параметрів, а для запису результатів спостережень зони будуть переводитись у звичайний вигляд. Методика оброблення результатів опосередкованих вимірювань наступна:

1) Визначаємо середні значення твердості та питомого електричного опору ( $n=10$  – кількість спостережень)

$$\overline{HB} = \sum_{i=1}^n \frac{HB_i}{n}, \quad \bar{\rho} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{n}, \quad (3.9)$$

Результати розрахунків для зразка №1:  $\overline{HB} = 0.0757$ ,  $\bar{\rho} = 0.2435$ ,

2) Визначаємо незміщене середньо квадратичне відхилення (СКВ) результатів спостережень твердості та питомого електричного опору:

$$\sigma_{HB} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (HB_i - \overline{HB})^2}{n-1}}, \quad \sigma_{\rho} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2}{n-1}} \quad (3.10)$$

Результати розрахунків для зразка №1:  $\sigma_{HB} = 0.0381$ ,  $\sigma_{\rho} = 0.0036$ .

3) Перевіряємо на наявність промахів згідно із правилом „трьох сігм”.

$$|HB_i - \overline{HB}| \leq 3\sigma_{HB}, \quad |\rho_i - \bar{\rho}| \leq 3\sigma_{\rho}, \quad (3.11)$$

У результаті виконаної перевірки всі значення спостережень твердості та питомого електричного опору відповідають умові (3.11).

4) Проводимо перевірку результатів спостережень на відповідність нормальному закону розподілу. Для цього використаємо критерій  $W$ , оскільки його можна застосувати за умови  $3 < n < 40$ .

Перевірка результатів спостережень твердості та питомого електричного опору за критерієм  $W$  була виконана згідно з [100].

Насамперед результати спостережень упорядковуємо у вигляді варіаційного ряду  $x'_1 \leq x'_2 \leq \dots \leq x'_n$ . Після цього вказані результати спостережень занесемо в розрахункову табл. 3.8. В нижній половині третьої колонки знизу вверх запишемо значення  $j$  від  $l$  до  $1$ , де  $l = n/2$  для парних  $n$  і  $l = (n-1)/2$  для непарних  $n$ . В даному випадку табл.3.8 заповнимо для результатів спостережень вимірювань твердості першого взірця.

На основі додатку Ж [100] для відповідних  $n$  та  $l$  знаходимо значення коефіцієнтів  $a_{n-j+1}$  для  $j$  від  $1$  до  $l$  і записуємо їх знизу вверх у колонку 4. Колонки 5 та 6 заповнюємо відповідно до значень, указаних у табл.3.8.

Алгоритм критерію  $W$ 

$i$	$x_i$	$j$	$a_{n-j+1}$	$\Delta x = x'_{n-j+1} - x'_j$	$a_{n-j+1} \cdot \Delta x$
1	2	3	4	5	6
1	110				
2	110				
3	111				
4	112				
5	114				
6	117	5	0.0399	3	0.1197
7	117	4	0.1224	5	0.612
8	119	3	0.2141	8	1.7128
9	119	2	0.3291	9	2.9619
10	127	1	0.5739	17	9.7563

Значення  $\varphi^2$  та  $b^2$  розраховуємо, враховуючи дані з табл. 3.8, наступним чином:

$$\varphi^2 = \sum_{i=1}^n (x'_i)^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x'_i \right)^2, \quad (3.12)$$

$$b^2 = \left\{ \sum_{j=1}^l a_{n-j+1} \cdot (x'_{n-j+1} - x'_j) \right\}^2. \quad (3.13)$$

Результати розрахунку за (3.12), (3.13) для спостережень твердості першого тестового взірця наступні:  $\varphi^2 = 0.0131$ ,  $b^2 = 0.0117$ . На основі одержаних значень  $\varphi^2$  та  $b^2$  розраховуємо значення критерію  $W$ :

$$W = \frac{b^2}{\varphi^2}. \quad (3.14)$$

Для твердості розраховане значення критерію  $W=0.8967$ . Задавшись певним рівнем значимості  $\alpha$ , який відображає найбільшу ймовірність помилковості гіпотези про належність результатів спостережень даної вибірки до нормального закону розподілу ( $\alpha = 0.05$ ) згідно з додатком К [100] знаходимо значення  $W^*$ . У нашому випадку табличне значення -  $W^*=0.842$ . Оскільки  $W > W^*$  ( $0.8967 > 0.842$ ), то можна вважати, що гіпотеза справедлива і розподіл спостережень твердості відповідає нормальному закону розподілу.

Для питомого електричного опору: розраховане значення критерію  $W=0.8893$ , табличне значення  $W^*=0.842$ , а перевірка –  $W > W^*$  вказує, що результати спостережень питомого електричного опору також відповідають нормальному закону розподілу.

5) Оскільки результати спостережень описуються нормальним законом розподілу, то визначаємо СКВ результатів прямих вимірювань твердості та питомого електричного опору:

$$\sigma_{HB} = \frac{\sigma_{HB}}{\sqrt{n}}, \quad \sigma_{\bar{\rho}} = \frac{\sigma_{\rho}}{\sqrt{n}}, \quad (3.15)$$

Результати розрахунків наступні:  $\sigma_{HB} = 0.0121$ ,  $\sigma_{\rho} = 0.0011$

6) Задаємося значенням імовірності  $\bar{P}_{зад} = 0.95$  і згідно з [101] знаходимо коефіцієнт Ст'юдента (коефіцієнт довіри) –  $z = 2.26$ .

7) Записуємо результати вимірювань параметрів  $HB$  та  $\rho$ :

$$HB = \bar{HB} \pm z\sigma_{HB}, \quad \rho = \bar{\rho} \pm z\sigma_{\rho}, \quad \bar{P} = \bar{P}_{зад} \quad (3.16)$$

Запис:  $HB = 114.9 \pm 3.8$ ,  $\rho = 198 \pm 0.67$ ,  $\bar{P}_{зад} = 0.95$

8) Розраховуємо середнє значення границі плинності:

$$\bar{\sigma}_T = f(\bar{HB}, \bar{\rho}) \pm \text{поправка } A. \quad (3.17)$$

Поправку  $A$  вводять тоді, коли виконується нерівність:

$$A \geq 0.8 \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma_T}{\partial HB}\right)^2 \cdot \sigma_{HB}^2 + \left(\frac{\partial \sigma_T}{\partial \rho}\right)^2 \cdot \sigma_{\rho}^2}, \quad (3.18)$$

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 \sigma_T}{\partial HB^2} \Delta HB + \frac{\partial^2 \sigma_T}{\partial \rho^2} \Delta \rho \right) + \frac{\partial^2 \sigma_T}{\partial HB \partial \rho} \cdot \Delta HB \cdot \Delta \rho, \quad (3.19)$$

де  $\Delta HB = \max(\bar{HB} - HB_i)$ ;  $\Delta \rho = \max(\bar{\rho} - \rho_i)$  – максимальні значення абсолютних похибок вимірювань твердості та питомого електричного опору.

Оскільки аналітичного виразу, який встановлює залежність границі плинності від питомого опору та твердості, не встановлено, то виконати перевірку згідно з (3.18)-(3.19) є важко вирішуваним завданням. Проте, в роботі [99] вказано на можливість проведення метрологічної оцінки інформаційно-вимірювальних систем, створених із застосуванням алгоритмів ШНМ. Так,

користуючись відомостями наведеними в [80], запишемо залежність границі плинності від твердості та питомого електричного опору аналітично:

$$\sigma_T = OUT \cdot \max YS + \min YS, \quad (3.20)$$

де

$$OUT = \frac{\{1\}}{\{1\} + \exp\left(\sum_{n=1}^{16} -\{LW\{2,1\}\} \cdot \left(\frac{\{2\}}{\{1\} + \exp(-2 \cdot \sum_{n=1}^{16} (\{IW\{1,1\}\} \cdot [hb; m] + b\{1\}))} - \{1\}\right) + b\{2\}\right)}, \quad (3.21)$$

$$ro = \frac{\rho - \min \rho}{\max \rho}, hb = \frac{HB - \min HB}{\max HB}, \quad (3.22)$$

де  $\max YS = 270$  МПа,  $\min YS = 230$  МПа,  $\min \rho = 135$  нОм·м,  $\max \rho = 260$  нОм·м,  $\min HB = 105$  НВ,  $\max HB = 140$  НВ.

Необхідно зазначити, що рівняння (3.13) має матричну форму, у зв'язку з чим виникають труднощі з його диференціюванням. Для розв'язання цієї задачі було використано прикладний пакет *Symbolic Toolbox* у середовищі *MATLAB 2006b*, який дає змогу виконувати диференціювання функцій із символьними змінними. Таким чином, було продиференційовано функцію границі плинності в частинних похідних по твердості та питомому електричному опору і виконано перевірку згідно з умовами (3.18)-(3.19):

$A = -0.7071 \leq 0.0246$  - отже поправка  $A$  не вводиться.

9) Здійснюємо попарний аналіз результатів спостережень твердості та питомого електричного опору з метою встановлення між ними кореляційної залежності згідно з формулою:

$$R = \frac{\frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n HB_i \cdot \rho_i - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n HB_i \right) \left( \sum_{i=1}^n \rho_i \right) \right]}{\sigma_{HB} \cdot \sigma_{\rho}}. \quad (3.23)$$

Результати розрахунку:  $R = -0.1738$ .

10) Виконуємо перевірку умови  $\frac{R\sqrt{n}}{1-R^2} < z$ . Підставляючи значення  $z = 2.26$  та  $R = -0.1738$ . Оскільки  $-0.5666 < z$ , то  $R=0$ .

11) Розраховуємо СКВ результату опосередкованого вимірювання  $\bar{\sigma}_\rho$ :

$$\sigma_{\bar{\sigma}_T} = \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma_T}{\partial HB}\right)^2 \cdot \sigma_{HB}^2 + \left(\frac{\partial \sigma_T}{\partial \rho}\right)^2 \cdot \sigma_{\rho}^2}. \quad (3.24)$$

Результат розрахунку:  $\sigma_{\bar{\sigma}_T} = 0.0020$

12) Попередньо встановлено, що аргументи функції (твердість та питомий електричний опір) описуються нормальним законом, тому розраховуємо значення коефіцієнта довіри  $z$  за такою формулою:

$$z = \sqrt{\frac{4}{9(1 - \bar{P}_{зад})}}. \quad (3.25)$$

Для  $\bar{P}_{зад} = 0.95$  результат розрахунку:  $z = 2.98$ .

13) Записуємо результат опосередкованого вимірювання:

$$\sigma_T = \bar{\sigma}_T \pm z \cdot \sigma_{\bar{\sigma}_T} \text{ при } \bar{P}_{зад} = 0.95. \quad (3.26)$$

Результат вимірювання:  $\sigma_T = 230.1 \pm 1.6$  МПа за  $\bar{P}_{зад} = 0.95$ .

Згідно із таким самим алгоритмом, були проведені розрахунки для тестових зразків №2 та №3 (табл.3.7). Результати загалом для всіх трьох тестових зразків:

Тестовий зразок №1 (дійсне  $\sigma_T = 251.8$  МПа):  $\sigma_T = 230.1 \pm 1.6$  МПа за  $\bar{P}_{зад} = 0.95$ .

Тестовий зразок №2 (дійсне  $\sigma_T = 294.3$  МПа):  $\sigma_T = 314 \pm 6.1$  МПа за  $\bar{P}_{зад} = 0.95$ .

Тестовий зразок №3 (дійсне  $\sigma_T = 472$  МПа):  $\sigma_T = 486.2 \pm 5.49$  МПа за  $\bar{P}_{зад} = 0.95$ .

Отже, зведена до діапазону (255 МПа) похибка визначення границі плинності сталей згідно із удосконаленим методом не перевищує 2.5 % за  $\bar{P}_{зад} = 0.95$ .

Висновки до розділу.

1) розроблено експериментальну установку для визначення питомого електричного опору сталей, яка реалізує чотиризондовий метод, зокрема запропоновано технічне рішення щодо конструкції контактного механізму, розробленого за результатами математичного моделювання з точки зору



розрахованого взаємного розміщення зондів для досягнення високої чутливості методу;

2) розроблено методику експериментальних досліджень щодо перевірки розробленого методу контролю границі плинності шляхом урахування кількох параметрів (питомого електричного опору, твердості), в якій вказані заходи з метою забезпечення достовірності результатів вимірювань;

3) встановлено експериментальним шляхом, що розроблена математична модель контролю питомого електричного опору чотиризондовим методом є адекватною реальному процесу контролю, зокрема залежність геометричної функції поправки від ширини об'єкта контролю повторює теоретичну криву;

4) проведено порівняльні лабораторні дослідження з визначення твердості за шкалою Брінеля, використовуючи стаціонарний кульковий твердомір та портативні твердоміри різних типів. Показано, що покази динамічного твердоміра типу ТД-32 в цілому співпадають з фактичними значеннями твердості (коефіцієнт кореляції становить 0.979), що вказує на можливість використання твердоміра в польових умовах;

5) проведено експериментальні дослідження щодо перевірки розробленого методу на прикладі зразків із конструкційних сталей. Результати досліджень (похибка визначення границі плинності становить 26 МПа) підтверджують раніше зроблені теоретичні висновки щодо вибору комплексу параметрів (твердість, питомий електричний опір) як оптимальних для визначення границі плинності;

6) Проведено метрологічну оцінку результатів багатократних опосередкованих вимірювань границі плинності на базі алгоритмів штучних нейронних мереж. Зведена до діапазону похибка визначення границі плинності зразків із конструкційних сталей згідно із запропонованим методом не перевищує 2.5% за  $\bar{P}_{зад} = 0.95$ .

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБЛЕННЯ ДОСЛІДНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВЗІРЦЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ТА МЕТОДИКИ ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ

Для проведення промислової апробації результатів теоретичних та експериментальних досліджень необхідно було розробити дослідно-експериментальний взірець установки для контролю механічних характеристик конструкційних сталей та проект нормативного документу (методики) проведення контролю в промислових умовах.

Контроль механічних характеристик сталевих конструкцій довготривалої експлуатації здебільшого необхідно здійснювати в польових умовах. Продукція, яка поставляється на підприємства і вимагає проведення вхідного контролю механічних характеристик, може контролюватися в умовах цеху. Тому для розробки дослідно-експериментальної установки, яка б забезпечувала можливість проведення контролю у таких умовах необхідно усунути ряд конструктивних і методичних недоліків експериментальної установки, яка використовувалась при лабораторних дослідженнях, а зокрема:

- недосконалість конструктивного виконання контактного механізму, який складається з двох окремих контакторів;
- тривалий час позиціювання контактного механізму на поверхні об'єкту контролю, що вимагає досконалих навичок роботи оператора;
- необхідність утримання контактного механізму під однаковим навантаженням, що вимагає підвищену зосередженість оператора;
- тривалий час розрахунку границі плинності під керуванням ПК.

З метою усунення даних недоліків постала необхідність розроблення на базі існуючої експериментальної установки дослідного взірця установки для проведення промислових випробувань. У процесі розроблення вказаної установки основну увагу необхідно звернути на розроблення нової конструкції

контактного механізму та спеціалізованого програмного забезпечення для реалізації розрахунку згідно із запропонованою математичною моделлю.

4.1. Розроблення дослідного взірця установки для визначення механічних характеристик конструкційних сталей

Для розроблення дослідного взірця установки для визначення механічних характеристик сталей були використані ті самі рішення принципи та підходи, що застосовувались для розроблення експериментальної установки. Основними відмінностями дослідної установки від експериментальної була відсутність вищезгаданих недоліків.

Функціональна схема дослідної установки зображена на рис. 4.1. В основу установки лягла концепція лабораторного взірця установки (див. рис. 3.3).

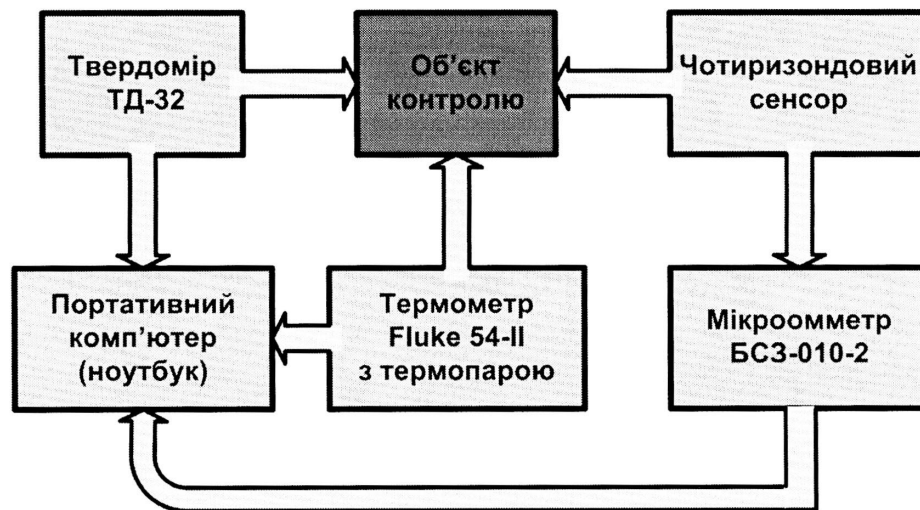


Рис.4.1. Функціональна схема дослідного взірця установки

Вимірювання твердості сталей здійснюється за допомогою серійного динамічного твердоміра типу ТД-32.

Чотиризондовий вимірювальний перетворювач виконаний в одному корпусі (рис.4.2), зібраного з трьох пластин: верхньої 1, середньої 2 та нижньої 3, скріплених чотирма болтовими з'єднаннями 4, чотирьох зондів-електродів – двох потенціальних (вимірювальних) 5 та двох зовнішніх зондів 6, призначених

для підведення постійного електричного струму в зону вимірювання. Пари зондів 5 і 6 розміщені симетрично відносно осі вимірювального контактного блоку. З обох кінців електродів виконана різьба, на яку нагвинчені гайки 7 та контргайки 8. Робочий кінець зонду – той, що взаємодіє з досліджуваною поверхнею 9, виконується конусним. Зонди-електроди 5,6 круглого перерізу виготовлені зі терmostійкої нержавіючої сталі марки 95X18. Вони були піддані термічній операції – гартування з метою забезпечення достатньої твердості контактних конусоподібних наконечників, для того щоб ті не втрачали гостроту кінців у ході тривалих вимірювань. Діаметр зондів становить 5 мм. Відстань між вістрями внутрішніх потенціальних зондів становить  $(60 \pm 0,1)$  мм, а між вістрями струмових та відповідними їм потенціальних зондів –  $(10 \pm 0,1)$  мм, що відповідає результатам математичного моделювання.

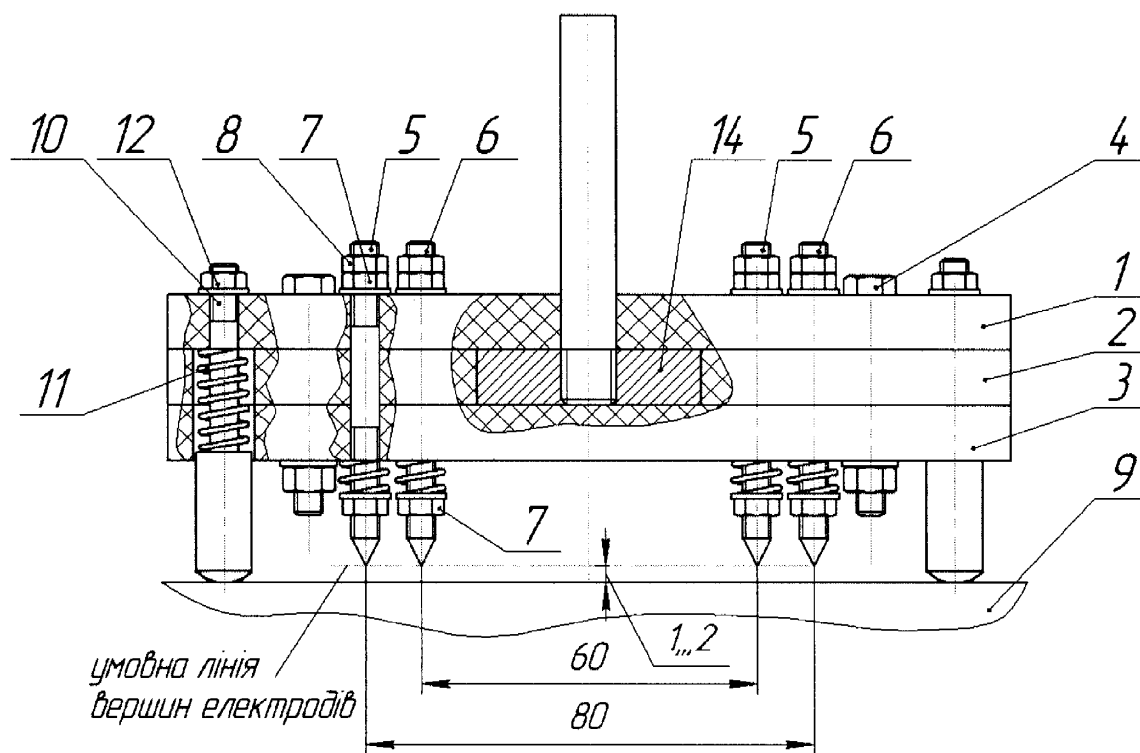


Рис.4.2. Загальний вигляд чотиризондового вимірювального перетворювача з місцевими розрізами

По кутах корпусу розміщено чотири упори 10, які виконано з можливістю осьового переміщення відносно корпусу і підпружинено пружинами стиску 11 у напрямку корпусу. Робочі частини упорів 10 виконані сферичними для

забезпечення точкового контакту з будь-якою формою досліджуваної поверхні 9. На неробочому кінці упори 10 виконана різьба, на яку нагвинчується гайка 12, яка служить регулюючим елементом осевого положення упора 10, а також регулює силу стискання пружини.

Підпружинення упор та зондів дозволяє самовстановлюватись корпусу та лінії зондів відносно досліджуваної поверхні з урахуванням її незначних нерівностей. Окрім того, зонди та упори виконуються з можливістю осевого переміщення відносно корпусу, що дозволяє проводити вимірювання питомого електричного опору на циліндричних поверхнях, наприклад, трубах.

Чотиризондовий вимірювальний перетворювач містить стрижень 13, розміщений по центру корпусу та вгвинчений у опорний диск 14, розміщений у середній плиті 2. На стрижень 13 насаджують навантажувальну гантель 15 заданої маси ( $10 \pm 0,05$ ) кг для забезпечення надійного стабільного електричного контакту з об'єктом контролю 9 (рис.4.3).

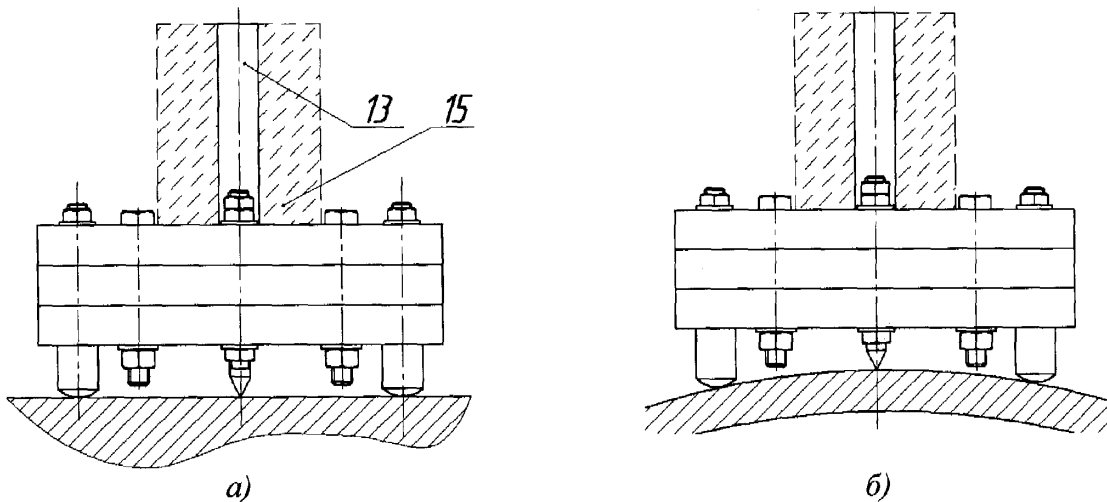


Рис.4.3. Профільний вигляд чотиризондового вимірювального перетворювача:  
а) – на плоскій горизонтальній площині; б) - на зовнішній циліндричній поверхні

Порядок роботи із чотиризондовим вимірювальним перетворювачем полягає в наступному. Вимірювальний перетворювач без вантажу встановлюють на попередньо підготовлену досліджувану поверхню 9 (див. рис.4.2) та чітко позиціонують його положення відносно неї. Гайками 12

нагвинченими на упори 10 відрегульовують положення корпусу разом з зондами 5, 6 так, щоб забезпечити попередній зазор 1...2 мм між зондами 5, 6 і досліджуваною поверхнею 9. У разі необхідності осьове положення зондів 5, 6 регулюють гайками 7 та фіксують контргайками 8. При цьому необхідно зберегти паралельність умовної лінії, що проходить через кінці зондів, та вимірювальної площини. У випадку вимірювання питомого електричного опору на поверхнях циліндричної форми забезпечити паралельність умовної лінії та твірної циліндричної поверхні (див. рис.4.3,б). Після цього плавно насаджують навантажувальну гантель 15 на стрижень 13, який вгвинчений у опорний диск 14. В результаті цього, пружини 11 стискаються, забезпечуючи самовстановлення корпусу на вимірювальній поверхні 9. Таким чином встановлюється електричний контакт зондів з об'єктом контролю, що робить пристрій готовим для вимірювання.

До переваг нового конструктивного виконання чотиризондового вимірювального перетворювача у порівнянні з контактним механізмом, використаним в експериментальних дослідженнях, можна віднести:

- зменшення похибки вимірювання, оскільки відстані між зондами є строго фіксованими;
- зменшення тривалості вимірювання за рахунок того, що оператору не потрібно власноруч забезпечувати електричний контакт (цю функцію виконує навантажувальна гантель);
- прикладання однакового навантаження за рахунок використання вантажу фіксованої маси 10 кг;
- зручність роботи.

На дану конструкцію чотиризондового вимірювального перетворювача оформлено та подано заявку на отримання патенту.

В портативний комп'ютер вводяться через клавіатуру виміряні значення твердості по шкалі Брінеля, електричного опору та температури поверхні об'єкту контролю. Вимірювання температури поверхні ОК здійснюється з допомогою цифрового термометра Fluke 54-II, оснащеного контактною

термопарою (серія NR-31В, тип К), з метою введення температурної корекції розрахованих значень питомого електричного опору.

Значення питомого електричного опору, приведені до температури 20°C, розраховується за формулою [102]:

$$\rho_{20} = \frac{\rho_t}{1 + \alpha(t - 20)}, \quad (4.1)$$

де  $\rho_{20}$ ,  $\rho_t$  - питомий електричний опір, який відповідає відповідно температурі 20°C і досліджуваній температурі;  $\alpha$  - температурний коефіцієнт опору сталі, (°C<sup>-1</sup>).

Температурний коефіцієнт опору є відмінним для різних марок сталей і сплавів. Для феритно-перлітних сталей  $\alpha = 0.0083$  (°C)<sup>-1</sup>.

На портативному комп'ютері встановлено програмне забезпечення на базі програмного продукту *Matlab R2006b*, яке дає змогу за значеннями твердості та приведеного до нормальних умов питомого електричного опору розрахувати дійсне значення границі плинності сталі згідно розробленого алгоритму (рис.4.4).

Програма розрахунку складається з двох основних модулів: 1) модуль розрахунку питомого електричного опору згідно із розробленою математичною моделлю; 2) розрахунковий модуль на базі алгоритмів штучних нейронних мереж, який дає змогу виконати двопараметричну апроксимацію границі плинності як функцію від комплексу інформативних параметрів – питомого електричного опору і твердості. Модуль на базі штучного інтелекту використовує можливості інструментальних засобів програмного середовища *Matlab R2006b* – вбудований модуль *Neural Network Toolbox*.

Загальний вигляд дослідного взірця установки, що призначена для контролю механічних характеристик конструкційних сталей, зображено на рис. 4.5.

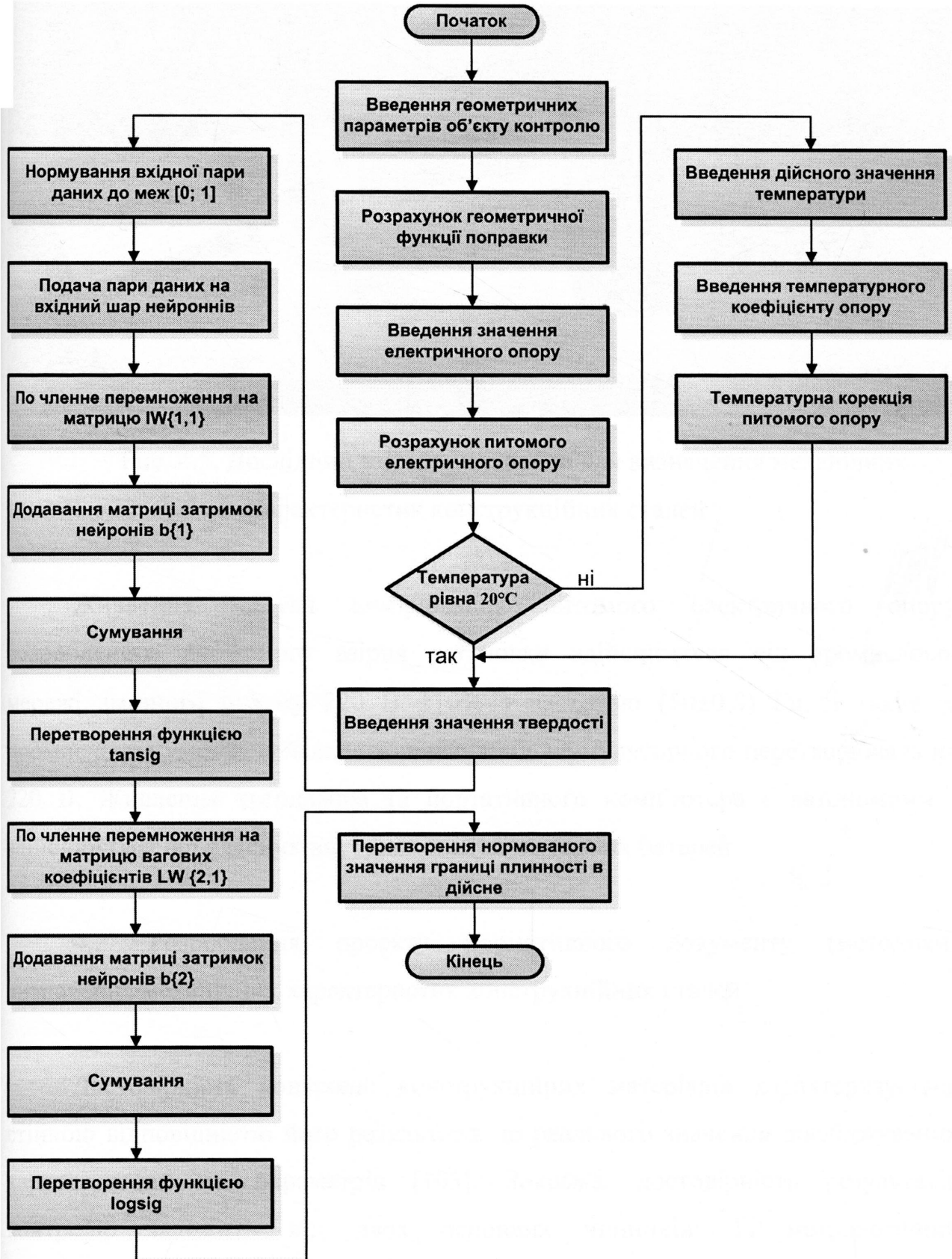


Рис. 4.4. Алгоритм оброблення виміральної інформації



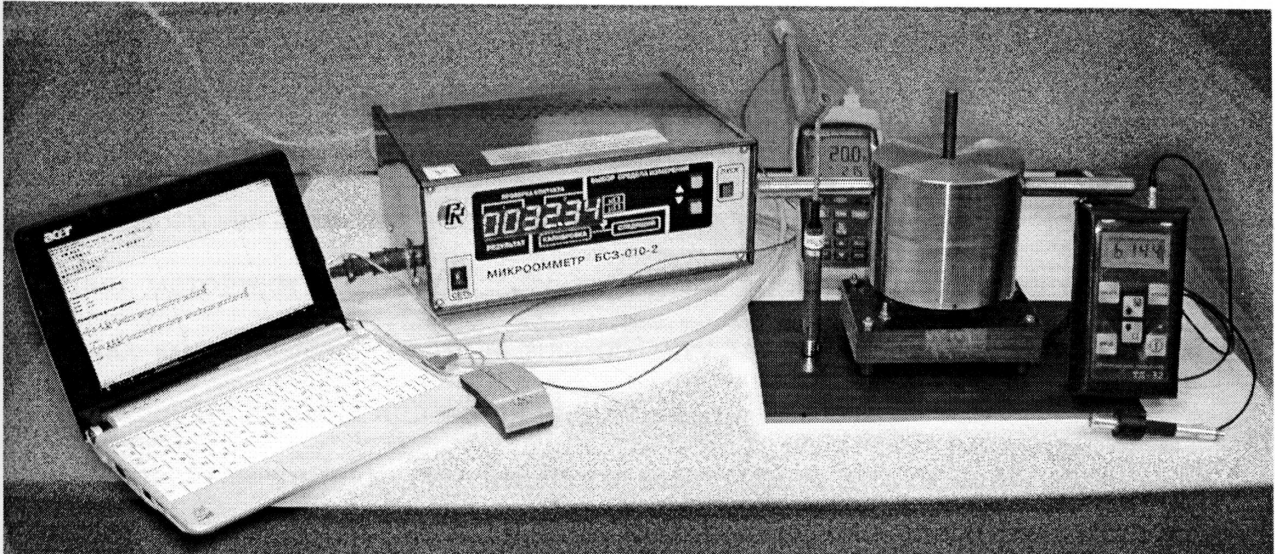


Рис. 4.5. Дослідний взірець установки для визначення механічних характеристик конструкційних сталей

Живлення модуля вимірювання питомого електричного опору розробленого дослідного взірця 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 акумуляторного перетворювача на  $220\text{ В}$ . Живлення твердоміра та портативного комп'ютера є автономним і здійснюється від власних внутрішніх акумуляторних батарей.

4.2. Розроблення проекту нормативного документу (методики) визначення механічних характеристик конструкційних сталей

Достовірність контролю конструкційних матеріалів характеризується стійкою відповідністю його результатів до реального значення досліджуваних характеристик чи параметрів [103]. Зокрема, достовірність результатів контролю залежить від двох основних чинників: 1) метрологічних характеристик апаратури; 2) використаних методик. Отже, правильно розроблена методика є запорукою одержання достовірних результатів із допомогою розробленої установки.

На сьогоднішній день існує небагато нормативних документів, які регламентують порядок визначення механічних характеристик сталей. Причому існують нормативні документи як для руйнівного визначення, так і для неруйнівного визначення механічних характеристик сталей. Зрозуміло, що руйнівні методики [104-106] застосувати на діючому об'єкті неможливо, а у випадках коли вирізка частини тіла об'єкту можлива, то необхідно затратити чимало часу на проведення таких випробувань.

Сучасні методики неруйнівного визначення механічних характеристик сталевих конструкцій регламентують здебільшого вимірювання таких інформативних параметрів як твердість та магнітних характеристик петлі гістерезису.

Так, нормативною базою магнітного контролю механічних характеристик конструкцій із феромагнітних сталей є Міждержавний стандарт ГОСТ 30415-96 [107]. Даний стандарт поширюється на сортовий, листовий, фасонний прокат, багат шарові листи із вуглецевих, легованих та електротехнічних марок сталей і встановлює неруйнівний метод контролю механічних та технологічних властивостей, а також мікроструктури.

Згідно даного стандарту магнітний метод контролю застосовується для визначення: фізичної та умовної границі плинності, відносного видовження після розриву, відносного звуження поперечного січення після розриву, відносного рівномірного видовження, коефіцієнта пластичної анізотропії, показників деформаційного зміцнення і нерівномірної пластичної деформації, фактичного опору розриву, твердості, величини зерна, чутливості сталі до механічного старіння, ударного згину, частки в'язкої складової в зламі, кута згину чи оцінки граничної пластичності при згині, глибини безвуглецевого шару, відносної деформації.

В стандарті регламентовано, що при неруйнівному контролі показників якості, що оцінюються по признаку “задовільно-незадовільно”, встановлюється допустима межа вимірюваної магнітної характеристики, що гарантує встановлення норми з прийнятою в стандарті ймовірністю.

Проте чітких рекомендацій щодо порядку проведення контролю в даному стандарті не наведено, а вказано тільки на необхідність встановлення кореляційних залежностей між досліджуваними механічними і магнітними характеристиками індивідуально на кожному підприємстві.

Наприклад в інструкції РД 12-411-01 [76], яка встановлює вимоги по проведенню технічної діагностики підземних сталевих газопроводів, по яким природний газ транспортується із надлишковим тиском не більше 1,2 МПа і зріджений вуглеводневий газ із надлишковим тиском не більше 1,6 МПа, регламентується визначення механічних характеристик. Поміж інших задач в програму шурфового діагностування підземних газопроводів входить задача визначення фактичних значень границі міцності ( $\sigma_{\text{вф}}$ ), границі плинності ( $\sigma_{\text{тф}}$ ).

При тривалій експлуатації газопроводу проходять наступні деградаційні зміни характеристик металу - зниження пластичності, вираженої в наближенні величин границі плинності  $\sigma_m$  і границі міцності  $\sigma_s$ .

Допустимі значення перерахованих параметрів, приведених до температури 20 °С, для труб із маловуглецевої сталі повинні бути в межах:

$$\sigma_{\text{тф}}/\sigma_{\text{вф}} \leq 0,9.$$

Фактичні значення механічних характеристик сталі  $\sigma_{\text{тф}}$ ,  $\sigma_{\text{вф}}$  визначаються шляхом перерахунку значень твердості, отриманих з допомогою переносного твердоміра по наступній методиці.

Для виміру твердості використовують переносні твердоміри ДИТ-02, Темп-2 и EQVOTIP швейцарської фірми «Процек». Вимірювання твердості проводиться по периметру труби газопроводу або в локальних зонах по його довжині.

Фактична твердість  $L_{\text{ф}}$  (по Лейбу) матеріалу газопровода розраховують по формулі:

$$L_{\text{ф}} = L_o + 2,21(D/S - 12,7),$$

де  $L_o$  – середнє арифметичне значення твердості;

$D$  – зовнішній діаметр газопроводу, мм;

$S$  - товщина стінки труби, мм.

Якщо  $D/S = 12,7$ , то  $L_\phi = L_o$ .

Границя міцності  $\sigma_b$  (кгс/мм<sup>2</sup>) і границя плинності  $\sigma_{0,2}$  (кгс/мм<sup>2</sup>) металу по величині твердості (по Лейбу) розраховують по наступним формулам:

$$\sigma_b = 9,55[149 + 1,22(2,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_\phi^3 - 3 \cdot 10^{-3} \cdot L_\phi^2 + 1,797L_\phi - 275,125) - 12,22];$$

$$\sigma_{0,2} = K \cdot 1,22(2,8 \cdot 10^{-6} L_\phi^3 - 3 \cdot 10^{-3} L_\phi^2 + 1,797L_\phi - 275,125),$$

де  $K = 0,2$  - для вуглецевих сталей.

В інструкції РД 03-410-01 [108] зазначається, що для визначення фізико-механічних характеристик матеріалу внутрішньої оболонки ізотермічних резервуарів використовують дюрOMETричний метод, який використовується для визначення границі плинності та міцності по вимірним значенням твердості.

Границя плинності для низьколегованих сталей в інтервалі від 20 до 45 кгс/мм<sup>2</sup> розраховується по результатам хімічного та кількісного металографічного аналізу по формулі:

$$\sigma_T = (\sigma_o^2 + \sigma_i^2)^{1/2} + (\Delta\sigma_{\phi.D.}^2 + \Delta\sigma_{\lambda.\phi.}^2 + \Delta\sigma_{\lambda}^2)^{1/2} + K_y d^{-1/2},$$

де  $\sigma_o$  - напруження тертя решітки  $\alpha$ -заліза, для даного розрахунку приймається рівним 30 МПа;

$\sigma_{\Pi}$  - напруження за рахунок зміцнення сталі перлітом;

$\sigma_{\Pi} = 2,4\Pi$ , МПа,  $\Pi$  - процент перлітної складової;

$\Delta\sigma_{т.р.}$  - напруження за рахунок зміцнення твердого розчину легуючими елементами:

$$\Delta\sigma_{т.р.} = 4670C_{C+N} + 33C_{Mn} + 86C_{Si} + 31C_{Cr} + 30C_{Ni} + 11C_{Mo} + 60C_{Al} + 39C_{Cu} + 690C_P + 3C_V + 82C_{Ti}, \text{ МПа};$$

$\Delta\sigma_{д.у.}$  - напруження за рахунок зміцнення сталі дисперсними частинами:

$$\Delta\sigma_{\lambda.\phi.} = \frac{0,46Gb}{\lambda - D} \ln\left(\frac{\lambda - D}{2b}\right),$$

де  $G = 8,4 \cdot 10^4$  МПа - модуль зсуву;

$b = 2,5 \cdot 10^{-7}$  мм - вектор Бюргерса;

$D$  - діаметр дисперсних зміцнюючих частин, мм;

$\lambda$  - віддаль між частинками, мм;

$\Delta\sigma_d$  - напруження за рахунок зміцнення дислокаціями, оцінюється по густині дислокацій  $\rho$ :

$$\Delta\sigma_d = 5Gb\rho^{1/2},$$

де  $d$  – середній умовний діаметр зерна фериту, визначається по ГОСТ 5639-82;

$$K_y = 20 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{1/2}.$$

Границя міцності сталі розраховується по співвідношенню:

$$\sigma_s = 0,34HB,$$

де  $HB$  – вимірне значення твердості по Брінелю.

В галузевому стандарті України ГСТУ 320.02829777.013-99 [109] вказується на доцільність визначення механічних характеристик сталей вихрострумовим методом контролю. Зокрема, пропонується використовувати спеціалізований прилад СІГМА-Т для контролю груп міцності та границі плинності сталей труб нафтогазового сортаменту, в тому числі бурового обладнання.

Аналіз нормативних документів, що регламентують визначення механічних характеристик сталей, показав, що вони здебільшого базуються на вимірюванні твердості. Твердість, виміряна портативними твердомірами, характеризує фактичний стан поверхневого шару об'єкту контролю. Тому в більшості випадків вимірювання твердості не достатньо щоб судити про технічний стан металоконструкцій. Використання магнітних інформативних параметрів обмежується тільки феромагнітними матеріалами. Крім того залежності механічних характеристик від магнітних параметрів носить неоднозначний характер.

Враховуючи вище сказане, доцільно розробити нормативний документ (Стандарт організації України), який би регламентував весь комплекс

необхідних операцій щодо визначення механічних характеристик сталей. Крім того слід застосувати комплексний підхід для збільшення достовірності результатів контролю. Нормативний документ повинен регламентувати також порядок контрольних операцій, які необхідно здійснювати перед проведенням контролю механічних характеристик. Дані операції необхідно проводити з метою встановлення бездефектності контрольованої ділянки, адже будь-які дефекти будуть впливати на значення питомого електричного опору, тим самим вносячи похибку у визначення механічних характеристик сталей.

Таким чином, було розроблено проект Стандарту організації України (СОУ) “Контроль механічних характеристик конструкційних сталей в промисловості. Методика” (додаток И). Тематично розроблений СОУ складається із 13-ти розділів.

У розділі 1 “Сфера застосування” вказуються види металоконструкцій, на які поширюється даний стандарт щодо контролювання їх механічних характеристик.

У розділі 2 “Нормативні посилання” наведено перелік нормативних документів, на які є посилання в розробленому стандарті.

Розділ 3 “Терміни та визначення понять” містить терміни та визначення, використані в данному стандарті.

У розділі 5 “Загальні вимоги” зазначено методи неруйнівного контролю, які необхідно застосовувати для визначення механічних характеристик сталей, а також умови для їх застосування. До таких методів належать електроконтактний чотиризондовий, динамічна твердометрія, а також коерцитиметричний (за необхідності).

Розділ 6 містить вимоги до організацій та персоналу, які здійснюють контролювання механічних характеристик матеріалів металоконструкцій в промисловості.

Розділ 7 містить вимоги охорони праці під час проведення робіт з контролювання механічних характеристик конструкційних сталей.

Розділ 8 містить перелік технічної та оперативної інформації про об'єкт контролю, яка повинна бути зібрана перед проведенням досліджень на металоконструкціях та зазначено першочергові місця, на яких повинно проводитися контролювання.

Розділ 9 містить вимоги до апаратури та засобів вимірювальної техніки, що використовуються перед і під час проведення контролю механічних характеристик сталей.

У розділі 10 наведено обсяг та види контрольних операцій перед проведенням робіт з визначення механічних характеристик матеріалів металоконструкцій. Для контролю геометричних параметрів об'єктів та на предмет виявлення дефектів типу порушення суцільності необхідно застосовувати наступні методи контролю:

- візуально-оптичний контроль;
- інструментальний контроль;
- акустична дефектоскопія;
- акустична товщинометрія.

У розділі 11 описано організацію робіт та підготовку до проведення контролю механічних характеристик сталевих конструкцій.

У розділі 12 описано методику контролю механічних характеристик сталевих конструкцій. Згідно даної методики за умови відповідності геометричних параметрів об'єктів нормативним значенням та відсутності дефектів типу порушення суцільності для визначення механічних характеристик сталей необхідно застосовувати наступні методи контролю:

- електроконтактний чотиризондовий;
- вимірювання твердості;
- вимірювання коерцитивної сили (за необхідності).

Розділ 13 “Оброблення результатів” містить перелік статистичних характеристик, що підлягають обов'язковому визначенню, а також рекомендована формула протоколу за результатами контролю.

Результати визначення механічних характеристик сталей згідно розробленого проекту методики можуть використовуватися організаціями для встановлення відповідності механічних характеристик заявленим під час вхідного контролю сталевих виробів, а також для виявлення деградаційних процесів металоконструкцій тривалої експлуатації з подальшим визначенням їх ресурсу безпечної експлуатації.

#### 4.3. Промислова апробація дослідно-експериментальної установки

Одержані результати теоретичних та експериментальних досліджень дали можливість розробити та виготовити дослідно-експериментальну установку та розробити проект Стандарту організації України (методики) визначення механічних характеристик сталей в промисловості.

Промислові випробування проводились у два етапи. Перший етап був проведений в умовах промислу ТзОВ “Івано-Франківський “Вторчормет”.

В умовах “Івано-Франківський “Вторчормет” було проведено промислову апробацію дослідного взірця експериментальної установки на трьох сталюх зразках, що володіють різними механічними характеристиками. Зразки були виготовлені прямокутної форми з однаковими геометричними розмірами: довжина становить 300 мм, ширина – 200 мм, товщина – 10 мм.

На кожному зразку було проведено по три вимірювання питомого електричного опору та твердості динамічним твердоміром ТД-32. Випробування проводилися з метою визначення границі плинності сталюх зразків.

З метою визначення дійсних значень границі плинності сталюх зразків, з кожного взірця було виготовлено по три стандартні пропорційні зразки згідно *ГОСТ 1497-84*, які були піддані руйнівним випробуванням. Руйнівні випробування проводилися в умовах Науково-виробничої фірми “Зонд” на випробувальній машині УММ-20 (зав.№742, свід. про повірку №1198 від 21.05.2010).



Покази експериментальної установки (середні значення за трьома вимірюваннями) та відповідні дійсні значення границі плинності відповідних сталей, визначені згідно *ГОСТ 1497-84*, наведені в табл.4.1.

Таблиця 4.1

**Результати визначення границі плинності конструкційних сталей**

<b>№ взірця</b>	<b>Значення границі плинності, визначені за ГОСТ 10006-80, МПа</b>	<b>Покази експериментальної установки, МПа</b>
<i>1</i>	<i>267</i>	<i>277</i>
<i>2</i>	<i>320</i>	<i>329</i>
<i>3</i>	<i>442</i>	<i>431</i>

Оскільки діапазон значень границі плинності, на роботу в якому був налаштований попередньо прилад, становив 230-500 МПа, то найбільша відносна похибка зведена до діапазону складає 4.1 %.

Таким чином, результати апробації дозволяють стверджувати про повторюваність показів експериментальної установки. Значення границі плинності, визначені за допомогою експериментальної установки, знаходяться в межах дійсних значень, визначених руйнівними випробуваннями.

Були виявлені наступні недоліки:

- 1) необхідність механічного зачищення поверхні взірців;
- 2) тривалий час встановлення вимірювального перетворювача контролю питомого електричного опору строго по центрі взірця.

Акт промислової апробації дослідно-експериментальної установки в умовах ТзОВ “Івано-Франківський ”Вторчормет” наведено в додатку К.

Наступний етап промислової апробації виконувався в умовах металобазу “Західхіміс” (м.Івано-Франківськ). Робоча група провела апробацію експериментальної установки на трьох різних зразках із листової конструкційної сталі прямокутної форми, які були вирізані з габаритних сталевих листів. Марки сталей – 325-09Г2С-12, сталь 45, 09Г2С. Геометричні

розміри зразків наведено в табл.4.2. Випробування проводилось з метою визначення дійсного значення границі плинності сталі.

Відповідно до методики експериментальних досліджень на кожному зразку проводилися по три вимірювання електричного опору та твердості. Усереднені значення твердості, електричного опору та розрахованого питомого електричного опору наведено в табл.4.2.

Таблиця 4.2

### Результати вимірювання твердості та питомого електричного опору

Марка сталі	Геометричні розміри зразків			Геометрична функція поправки, ум.од	Електричний опір, мкОм	Питомий електричний опір, нОм·м	Твердість НВ
	Довжина, мм	Ширина, мм	Товщина, мм				
<i>09Г2С</i>	400	300	10	0,2432	21,73	332	174
<i>325-09Г2С-12</i>	400	300	12	0,2843	19,59	350	207
<i>Сталь 45</i>	400	300	30	0,4877	8,97	275	163

Значення границі плинності, визначеної з допомогою експериментальної установки за значеннями питомого електричного опору і твердості, та відповідні фактичні значення границі плинності, вказаних у сертифікатах на вказані марки сталі (копії сертифікатів додаються), наведені в табл. 4.3.

Значення границі плинності, визначені за допомогою експериментальної установки знаходяться в межах дійсних значень згідно із заявленими у відповідних сертифікатах на сталі.

### Результати визначення границі плинності сталей

Марка сталі	Значення границі плинності, вказаних в сертифікаті, МПа	Покази експериментальної установки, МПа
<i>09Г2С</i>	<i>399</i>	<i>409</i>
<i>325-09Г2С-12</i>	<i>420</i>	<i>411</i>
<i>Сталь 45</i>	<i>345</i>	<i>350</i>

У ході випробувань були відзначені наступні недоліки:

- 1) необхідність проведення попереднього зачищення поверхні зразків;
- 2) тривалий час позиціонування вимірювального перетворювача контролю питомого електричного опору відносно центра зразка;
- 3) відсутність автоматизації розрахунку значень границі плинності сталей.

Акт промислової апробації дослідно-експериментальної установки в умовах ТзОВ “Західхімліс” наведено в додатку Л.

Висновки до розділу.

Подані в даному розділі результати можна звести до таких основних висновків:

- 1) розроблено дослідно-експериментальний взірець установки для визначення механічних характеристик сталей. Описана конструкція установки, будова та робота основних вузлів;
- 2) розроблено та подано алгоритм роботи програмного забезпечення для оброблення вимірювальної інформації;

3) розроблено проект Стандарту організації України (методики) неруйнівного контролю механічних характеристик сталей, де основну увагу приділено порядку здійснення контрольних операцій;

4) проведено промислові випробування установки в умовах промислу ТзОВ "Івано-Франківський "Вторчормет" та ТзОВ "Західхімліс".

## 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  $\bar{P}_{зад} = 0.95$ . 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 “Західхімліс”. Розроблено проект методики (СОУ) визначення механічних характеристик конструкційних сталей за допомогою розробленої установки.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

- 1 Про затвердження Державної науково-технічної програми „Ресурс” : від 8 жовтня 2004 р. № 1331 / Постанова Кабінету Міністрів України. – Режим доступу:.....  
<http://www.kmu.gov.ua/control/uk/meetings/agenda?mid=8851097>.
- 2 Старение труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров, Р.С. Зайнуллин, К.М. Ямалеев, А.В. Росляков – М.: Недра, 1995. – 222с. - ISBN 5-247-03080.
- 3 Ямалеев К. М. Старение металла труб в процессе эксплуатации трубопроводов / К. М. Ямалеев. – М.: ВНИИОЭНГ, 1994. – 64 с.
- 4 Яковлева Т.Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов / Т.Ю. Яковлева. – К.: Наукова книга, 2003. – 235 с.
- 5 Бабич В.К. Деформационное старение стали / В.К. Бабич, Ю.П. Гуль, И.Е. Долженков. - М.: Металлургия, 1972. – 122 с.
- 6 Бида Г.В. Физическое обоснование контроля ударной вязкости проката из малоуглеродистых и низколегированных сталей магнитными методами / Г.В. Бида, В.М. Камардин // Дефектоскопия. – 1995. - №10. – С.3-31.
- 7 Гумеров А.Г. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов / А.Г. Гумеров, Р.С. Гумеров, К.М. Гумеров. - М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. - 310 с.
- 8 Карпаш О.М. Визначення фактичних фізико-механічних характеристик сталей металоконструкцій довготривалої експлуатації із врахуванням структури / О.М. Карпаш, М.О. Карпаш, Є.Р. Доценко // Организация неразрушающего контроля качества продукции в промышленности: 4-а наук.-практ. конф., Таба, Єгипет, 18-25 квітня 2008 р.: тези конф. – Таба, 2008. – С.4.
- 9 Бабенко Э.Г. Железоуглеродистые сплавы: учеб. пособие / Э.Г. Бабенко. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2005. – 115 с.

- 10 Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 448с. – ISBN 5-217-03300-2.
- 11 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.
- 12 Карпаш О. Общий обзор методов оценки физико-механических характеристик металлов/ Олег Карпаш, Игорь Молодецкий, Максим Карпаш. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. – №2. – С.18-22.
- 13 Пат. 2047157 Российская Федерация, МПК G01N3/40. Способ контроля твердости материала и устройство для его осуществления / Брызгалов В.Н., Карташевич Р.С., Тугенгольд А.К. ; заявитель и патентообладатель Малое внедренческое науч.-произв. предпр-е “Политехник”. - № 5040477/28 ; заявл.29.04.1992 ; опуб. 27.10.1995. – 15 с. : ил.
- 14 Пат. 2143106 Российская Федерация, МПК G01N3/42. Способ определения механических характеристик материалов / Матюнин В.М., Волков В.П. ; заявитель и патентообладатель Московский энергетический ин-т (тех. ун-т). - № 98113727/28 ; заявл. 17.07.1998 ; опуб. 20.12.1999. – 5 с. : ил.
- 15 Пат. 13952 Україна, МПК G01N3/40. Спосіб визначення в'язкості руйнування матеріалів / Лебедев А.О., Музика М.Р., Швець В.П. ; заявник і патентовласник Ін-т проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАНУ. – u200511079 ; заявл. 22.11.2005 ; опуб. 15.04.2006. – 5 с.
- 16 Костин В.Н. Многопараметровые методы структуроскопии стальных изделий с использованием магнитных свойств вещества / В.Н. Костин, А.А. Осинцев, А.Н. Сташков, Т.П. Царькова // Дефектоскопия. - 2004. - №3. - С.70-81.



- 17 Карпаш М.О. Застосування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик нафтогазового обладнання / М.О. Карпаш, І.С. Кісіль, О.М. Карпаш, І.А. Молодецький // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – № 2. – С.13-18.
- 18 Карпаш М.О. Обґрунтування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій / М.О. Карпаш // Методи та прилади контролю якості. – 2004. - № 12. – С. 30-33.
- 19 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.
- 20 Михеев М.Н. Связь магнитных свойств со структурным состоянием вещества – физическая основа магнитного структурного анализа / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов // Дефектоскопия. – 1981. - №8. – С. 8-21.
- 21 Михеев М.Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов – М.: Наука, 1993. – 252с. – ISBN 5-02-001622-5.
- 22 Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей / М.А. Мельгуй. - Мн.: Наука и техника, 1980. - 184 с.
- 23 Вонсовский С.В. Ферромагнетизм / С.В. Вонсовский, Я.С. Шур. - М.-Л.: ГИТГЛ, 1948. - 816 с.
- 24 Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практическое применение / С. Тикадзуми.- М.: Мир, 1987. - 419 с.
- 25 Костин В.Н. Возможности магнитного контроля механических свойств сталей с различным содержанием углерода после холодной пластической деформации и отжига / В.Н. Костин // Дефектоскопия. - 1989. - №5. - С.35-42.
- 26 Бида Г.В. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук // Дефектоскопия. – 2000. - №10. – С.3-28.

- 27 Бида Г.В. Магнитный контроль механических свойств проката / Г.В. Бида, Э.С. Горкунов, В.М. Шевнин. - Екатеринбург: УрО РАН, 2002. - 250 с.
- 28 Михеев М.Н. Зависимость показаний коэрцитиметра с приставным электромагнитом от параметров испытуемых изделий / М.Н. Михеев, И.А. Кузнецов, Т.П. Царькова // Дефектоскопия. – 1973. - №2. - С.116-120.
- 29 Пат. 1377789 СССР, МПК G 01 R 33/12. Автоматический феррозондовый дифференциальный коэрцитиметр / Мусихин С.А. ; заявитель и патентообладатель Тюменский индустриальный ин-т. - № 3957446/24-21 ; заявл. 17.09.95 ; опуб. 29.02.88, Бюл. №8. – 3с.: ил.
- 30 Назарчук З.Т. Комплекс технічних засобів для електромагнітного неруйнівного контролю конструкцій тривалої експлуатації / З.Т. Назарчук, А.Я. Тетерко, В.Г. Рибачук, Я.П. Кулинич // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2004-2006 рр. – Київ: ІЕЗ ім.Є.О.Патона НАН України. – 2006. – С. 39-42.
- 31 Бида Г.В. Неразрушающий метод контроля механических свойств труб нефтяного сортамента / Г.В. Бида, Н.Д. Почуев, А.Н. Сташков // Дефектоскопия. – 2002. - №10. – С.14-29.
- 32 Perez-Benitez J.A. A study of plastic deformation around a defect using the magnetic Barkhausen noise in ASTM 36 steel / J.A.Perez-Benitez, J.Capo-Sanchez, J.Anglada-Rivera, L.R. Padovese // NDT&E International. – 2008. – vol.41. – P.53-58.
- 33 Дубов А. Исследование свойств металла с использованием метода магнитной памяти / А. Дубов // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1997. - №9. - С.35-39.
- 34 Бида Г.В. Магнитные характеристики тела – параметры неразрушающего контроля качества отпуска закаленных сталей (обзор) / Г.В. Бида // Дефектоскопия. – 2002. - №6. - С.19-33.

- 35 Bida G.V. Nondestructive method for testing stress-strain properties of oil pipes / G.V. Bida, N.D. Pochuev, A.N. Stashkov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2002. - Vol.38. - No10. - P.725-738.
- 36 Костин В.Н. О возможности оценки химического состава сталей по их магнитным и электрическим свойствам в ферритоперлитном и мартенситном состояниях / В.Н. Костин, Т.П. Царькова, Г.В. Бида, А.С. Малышкин // Дефектоскопия. – 1998. - №5. - С.24-31.
- 37 Шарко А.В. Современное состояние и перспективы развития акустических методов контроля прочностных свойств конструкционных материалов (обзор) / А.В. Шарко // Дефектоскопия. - 1983. - № 5. - С. 72-87.
- 38 Крауткремер Й. Ультразвуковой контроль материалов : [справочное издание.] / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
- 39 Муравьев В.В. Скорость звука и структура сталей и сплавов / В.В. Муравьев, Л.Б. Зуев, К.Л. Комаров. – Новосибирск: Наука, 1996. - 184 с.
- 40 Муравьев В.В. Взаимосвязь скорости ультразвука в сталях с режимами их термической обработки / В.В. Муравьев // Дефектоскопия. – 1989. - №2. - С.66-68.
- 41 Полетика И.М. Об ультразвуковом контроле неоднородности механических свойств горячекатаной стали / И. Полетика, Н. Егорова, О. Куликова, Л. Зуев // Журнал технической физики. – 2001. – т.71. – вып. 3. – С.37-40.
- 42 Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов / М.Л. Бернштейн. - М.: Металлургия, 1977. – 431 с.
- 43 Ботаки А.А. Ультразвуковой контроль твердости сталей / А.А. Ботаки, А.И. Глебов, А.В. Шарко // Дефектоскопия. – 1974. - № 4. - С. 124-125.
- 44 Лебедев А.А. Оценка надежности металлов энергооборудования акустическим методом с использованием поверхностных волн / А.А. Лебедев, А.В. Шарко // Надежность трубопроводов электрических

- станций: Всесоюз. н/т совещание, Москва, 1990 р.: тезисы доклада. - М., 1990. – С.69-71.
- 45 Шарко А.В. Ультразвуковой механических свойств труб пароперегревателей тепловых электростанций / А.В. Шарко, В.В. Муравьев, Е.В. Каркешко // Дефектоскопия. – 1991. - №12. - С.10-17.
- 46 Иванов А.И. Использование продольно-поверхностных волн при контроле твердости стали / А.И. Иванов, А.А. Лебедев, А.В. Шарко // Дефектоскопия. – 1990. - №2. - С.89-91.
- 47 Лебедев А.А. Акустический контроль механических свойств стальных изделий поверхностными волнами Рэлея / А.А. Лебедев, А.В. Шарко // Дефектоскопия. – 1990. - №10. - С.14-19.
- 48 Пат. 2224249 Россия, МПК G 01 N 29/18. Способ измерения физико-механических характеристик материала листового проката / Паврос А.С., Паврос С.К., Щукин А.В. ; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский гос. электротех. ун-т. - № 2002111891/28 ; заявл. 06.05.2002 ; опубл. 20.02.2004. – 6 с.: ил.
- 49 Кошовий В.В. Технології і засоби ультразвукової комп'ютерної томографії для неруйнівної оцінки об'ємної однорідності властивостей матеріалу в товстолистових конструкціях обладнання АЕС / В.В. Кошовий, О.Є. Левицький, А.Б. Лозинський, І.М. Романишин // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2004-2006 рр. – Київ: ІЕЗ ім.Є.О. Патона НАН України. – 2006. – С. 196-201.
- 50 Пенкин А. Г. Оценка степени деградации механических свойств и остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической твердости / А. Г. Пенкин, В.Ф. Терентьев, Л. Г. Маслов // матеріали Інтернет-сторінки. – Режим доступу: [www.sds.ru/articles/degradation/index.html](http://www.sds.ru/articles/degradation/index.html)

- 51 Дробот Ю.Б. Применение акустической эмиссии при определении предела упругости / Ю.Б. Дробот, В.В. Корчевский // IX Всесоюзная н/т конф. по неразрушающим методам контроля, Минск: тезисы докл. – Минск, 1981. - Ч. 2. - С. 173-174.
- 52 Данилевин М.Н. Термоэлектрический прибор ТМС-МП для сортировки сталей по маркам / М.Н. Данилевин, В.С. Янковский // Дефектоскопия. – 1982. - №9.- С.94-95.
- 53 Кузнецов И.А. Термоэлектрические свойства сталей и прибор для контроля химического и фазового состава / И.А. Кузнецов, В.М. Окунев // Дефектоскопия. - 1993. - №8. – С.78-85.
- 54 Кашубский А.Н. Идентификация конструкционных материалов методами неразрушающего контроля физико-механических характеристик и структурных параметров: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.11.13 “Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий” / Кашубский Александр Николаевич; Красноярский гос. техн. ун-т. – Красноярск, 2006. – 20 с.
- 55 Кузнецов И.А. Термоэлектрические датчики для контроля материалов и изделий без разрушений / И.А. Кузнецов // Дефектоскопия. – 1973. - №1. – С.5-12.
- 56 Плотникова Г.А. О совмещении вихретокового и термоэлектрического методов при сортировке сталей по маркам / Г.А. Плотникова // Дефектоскопия. – 1983. - №10. – С.19-25.
- 57 Дорофеев А.Л. Физические основы электромагнитной структуроскопии / А.Л. Дорофеев, Р.Е. Ершов – Новосибирск: Наука, 1985. – 182 с. – ISBN 5-1180226.
- 58 Пат. 93002623 Россия. МПК G 01 N 27/90. Вихретоковое устройство для неразрушающего контроля параметров материалов / Чаплыгин В.И., Потапова Н.Ф., Бочаров С.Д. - № 93002623/28 ; заявл. 13.01.1993 ; опубл. 20.12.1996.

- 59 Горкунов Э.С. Взаимосвязь между магнитными, электрическими свойствами и структурным состоянием термически обработанных сталей – основа определения прочностных характеристик изделий неразрушающими методами: [методические рекомендации] / Э.С. Горкунов – Свердловск: УЦ АН СССР, 1985. – 62с.
- 60 Карпаш О.М. Проблемні питання визначення питомого електричного опору ферромагнітних сталей / О.М. Карпаш, Є.Р. Доценко, М.О. Карпаш // Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2009 : 6-а національна н/т конф., 9 – 12 червня 2009 р. : збірник доповідей. - К.: УТ НКТД, 2009. – с.308-311.
- 61 Журавлёв Л.Г. Физические методы исследования металлов и сплавов: Учебное пособие для студентов металлургических специальностей / Л.Г. Журавлёв, В.И. Филатов – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 157 с.
- 62 Bowler N. Electrical conductivity measurement of metal plates using broadband eddy-current and four-point methods / N. Bowler, H. Yongqlang // Measurement science & technology. - 2005. - vol. 16. - №11. - P. 2193-2200.
- 63 Чаплыгин В.И. Электромагнитный способ селективного контроля магнитной проницаемости и электропроводности ферромагнитных материалов / В.И. Чаплыгин, В.С. Шокарев, Я.В. Мальцева // Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання: Міжнар. н/т конф. і виставка, Івано-Франківськ, 2-5 лист. 1999 р.: матер. конф. – Івано-Франківськ: Факел, 1999. – С.16-18.
- 64 Сандовский В.А. Об измерении удельной электрической проводимости и магнитной проницаемости с использованием накладных вихретоковых преобразователей / В.А. Сандовский, Н.И. Носальская // Дефектоскопия.– 1991. – №12. – С.44-48.
- 65 Яцун М.А., Яцун А.М. Чутливість інформативних величин до фізичних параметрів об'єкта при контролі імпульсним вихрострумовим методом / М.А. Яцун, А.М. Яцун. // Сучасні прилади, матеріали і технології для

- неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання: 5-а Міжнародна н/т конференція і виставка, 2-5 грудня 2008 р.: тези. – Івано-Франківськ: Факел, 2008. - С.133-135.
- 66 Heaney Michael B. Electrical Conductivity and Electrical Conductivity and Resistivity // The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook / Michael B. Heaney. - CRC Press LLC, 1999. – Chapter 43. – ISBN 084932145X.
- 67 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.
- 68 Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов: учеб. для вузов / Л.П. Павлов. – М.: Высш. шк., 1987. – 239 с.
- 69 Асанов М.В. Электротепловой метод раздельного контроля удельной электрической проводимости и толщины покрытий / М.В. Асанов, Ю.А. Плотников, А.Е. Пятышин, Л.А. Чернов // Дефектоскопия. - 1993. – №12. – С.41-48.
- 70 Nahm S.H. Evaluation of fracture toughness of degraded Cr-Mo-V steel using electrical resistivity / S.H Nahm., Y.I. Kim, K.M.Yu, A. Kim // Journal of Materials Science. - 2002. – V.37. - N16. - P.3549-3553.
- 71 Takeo F. Distinction of Alloy Steels by Means of the Closely Coupled Probes Potential Drop Technique / F. Takeo, M. Saka, T. Sagae // 15th World Conference on NDT, 15-21 October 2000, Rome. - Режим доступу: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn497/idn497.htm>
- 72 Кісіль І.С. Прилад для контролю фізико-механічних характеристик сталей ФМХ-1 / І.С. Кісіль, М.О. Карпаш, І.Р. Вашишак // Методи та прилади контролю якості. – 2005. - № 14. – С.77-80.

- 73 Карпаш М.О. Новый підхід до визначення фізико-механічних характеристик сталей з врахуванням їх структури / М.О. Карпаш, Є.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.
- 74 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.
- 75 Ашкрофт Н. Физика твердого тела: в 2-х т. / Н. Ашкрофт, Н. Мермин - М.: Мир, Т.2. - 1979. - 399 с.
- 76 Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов: РД 12-411-01. – [Срок введения в действие 2001 – 09 – 15]. – М. : Госгортехнадзор России, 2001. – 50с.
- 77 Карпаш М.О. Підвищення інформативності визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій довготривалої експлуатації / М.О. Карпаш, Є.Р. Доценко // Методи та прилади контролю якості. – 2007. - № 18. – С.13-17.
- 78 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.
- 79 Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с. – ISBN 5-8459-0890-6.
- 80 Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. / Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2004 . – 344с.



- 81 Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі: Навчальний посібник / О.Г. Руденко, Є.В. Бодянський. – Харків: ТОВ “Компанія СМІТ”, 2006. – 404 с. – ISBN 966-8530-73-X.
- 82 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; заявл. 25.02.2008; опуб. 25.06.2009, Бюл. №12. – 3с.
- 83 Honeycombe R.W. K. Steels. Microstructure and Properties / R.W. K. Honeycombe, H. K. D. H. Bhadeshia. - Elsevier Ltd, 2006. – 345 p.
- 84 Білокур І. П. Основи дефектоскопії : [підручник] / І. П. Білокур. – К.: Азимут-Україна, 2004. – 496 с. – ISBN 966-8405-04-8
- 85 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.
- 86 Карпаш М.О. Питомий електричний опір як інформативний параметр визначення фактичних фізико-механічних характеристик конструкційних сталей / М.О.Карпаш, Є.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.
- 87 Лившиц Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б.Г. Лившиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Липецкий. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
- 88 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.

- 89 Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения удельного электрического сопротивления мостом постоянного тока : ГОСТ 12119.7-98. – [Чинний від 1999 – 07 – 01]. – Мн.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. – 7с.
- 90 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 НКТД, 2009. – С.308-311.
- 91 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 «Леотест-2010»: 15 Міжнар. наук.-техн. конф., Славське, 15-20 лютого 2010 р.: матер. конф. – Львів, 2010. – С.53-54.
- 92 Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров: определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
- 93 Доценко Є.Р. Математичне моделювання контролю питомого електричного опору матеріалів електроконтактним чотиризондовим методом / Є.Р. Доценко // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – №1. – С. 82-90.
- 94 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.

- 95 Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю: ГОСТ 9012-59. – [Чинний від 1960 – 01 – 01]. – М.: Стандартиформ, 2007. – 39 с.
- 96 Металлы. Методы испытаний на растяжение: ГОСТ 1497-84. – [Чинний від 1986 – 01 – 01]. – М.: Госстандарт СССР, 1986. – 28 с.
- 97 Карпаш М.О. Експериментальні дослідження щодо визначення фактичних фізико-механічних характеристик конструкційних сталей / М.О.Карпаш, Є.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.
- 98 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.
- 99 Кісіль І.С. Метрологічна оцінка результатів контролю фізико-механічних характеристик матеріалів металоконструкцій / І.С. Кісіль, М.О. Карпаш // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів (серія), вип.11.: Зб. наук. праць. – Львів: ФМІ ім.Г.В. Карпенка НАН України, 2006. – С. 175-181.
- 100 Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань: навч. посіб. / І.С. Кісіль. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400 с.
- 101 Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
- 102 Черепин В.Т. Экспериментальная техника в физическом металловедении / В.Т. Черепин. – К.: Техніка, 1968. - 280 с.

- 103 Механіка руйнування і міцність матеріалів у 10 т. / Фізико-механічний інститут ім.Г.В.Карпенка НАН України; [Під ред.З.Т. Назарчука]. - Львів:, 2001. - (Серія «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»). Т. 5. - 2001 - 1134 с. – ISBN 978-966-02-5275-2.
- 104 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах : ГОСТ 9454-78. – [Чинний від 1978 – 04 – 17]. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1978. – 18с.
- 105 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара: ГОСТ 22762-77. - [Чинний від 1979 – 01– 01]. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1977. – 13с.
- 106 Сварные соединения. Методы определения механических свойств: ГОСТ 6996-66. - [Чинний від 1967 – 01– 01]. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1967. – 86с.
- 107 Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом : ГОСТ 30415-96. - [Чинний від 1998 – 01 – 01]. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. – 12 с.
- 108 Инструкция по проведению комплексного технического освидетельствования изотермических резервуаров сжиженных газов : РД 03-410-01. - [Чинний від 2002 – 01 – 01]. – М.: Госгортехнадзор России, 2002. – 110 с.
- 109 Рекомендації по проведенню неруйнівного контролю бурового обладнання : ГСТУ 320.02829777.013-99. - [Чинний від 2000– 05 – 01]. – Івано-Франківськ: НВФ “Зонд”, 2000. – 192 с.

## Додаток А

## Фізико-механічні характеристики іноземних марок сталей

Таблиця А.1

## Фізичні та механічні характеристики сталей

№	Марка сталі	Границя	Границя	Питомий	Теплопровідність	Твердість
		міцності	плинності	електричний		
		МПа	МПа	нОм*м	Вт/(м*К)	НВ
1	2	3	4	5	6	7
<b>Аустенітні сталі</b>						
1	75X1	800	400	1200	16.3	-
2	N08811	500	170	990	12	-
3	N06690	585	240	1110	11	160
4	N08800	520	145	990	12	150
5	N08028	550	220	990	10	-
6	S35315	650	270	1000	11	160
7	N08904	520	230	940	12	160
8	S31002	500	210	840	13	155
9	S30815	650	310	840	13	190
10	904L	1400	1190	940	12	-
11	N08904	490	220	940	12	-
12	S30815	600	310	840	13	217
13	904L	520	230	940	12	230
14	Nikrothal 70	800	425	1180	13	185
15	Nikrothal 80	725	300	1090	15	160
16	Alkrothal 14	580	435	1250	16	220
17	Nikrothal 70	875	450	1180	13	185
18	Nikrothal 60	650	300	1110	13	160
19	Nikrothal 40	700	400	1040	13	165
20	Nikrothal 80	780	365	1090	15	180
21	S35315	720	360	1000	11.3	-
22	314	595	275	960	11.9	-
23	310S	600	270	960	11.9	-
24	S30815	700	370	840	15	-
25	309	610	270	870	12.6	-
26	309S	620	300	870	12.6	-
27	S30415	660	245	840	15	-
28	321	570	250	740	13.9	-
29	304H	600	290	710	14.3	-
30	S34565	825	420	920	12	-
31	S31254	610	300	850	14	210
32	N08926	750	300	1000	12	-
33	904L	600	260	1000	12	180
34	S31050	630	250	750	12	-
35	317LMN	640	310	850	14	-
36	317L	610	300	850	14	-
37	316L	570	270	750	15	150

## Продовження таблиці А.1

38	S31653	670	350	850	14	180
39	316LN	620	320	750	15	-
40	316L	570	280	750	15	165
41	316	590	300	750	15	165
42	316L	570	280	750	15	165
43	316	570	280	750	15	160
44	304L	580	280	730	15	155
45	304L	570	250	730	15	-
46	305	585	275	730	15	-
47	303	570	250	730	15	160
48	321	640	320	730	15	-
49	304LN	580	280	730	15	165
50	304L	600	290	730	15	165
51	201	720	390	700	15	-
52	301LN	765	360	730	15	-
53	301	800	300	730	15	-
54	N06002	720	324	1158	9.1	-
55	N06626	940	485	1289	12.6	-
56	S34565	903	469	920	13	-
57	S31266	750	420	1000	12	220
58	N08028	500	220	1000	12	250
59	N08926	650	320	950	13	200
60	S31254	650	330	900	13	210
61	B 625	550	245	800	17	170
62	310Mo LN	550	260	950	14	-
63	314	600	285	950	14	-
64	310S	550	245	900	14	-
65	309S	540	240	800	14	-
66	S30815	680	350	900	15	-
67	302 B	540	245	900	15	-
68	317 L	515	210	750	14	-
69	317 LN	590	290	800	14	-
70	317 LNM	590	285	800	14	-
71	316 LN	580	280	750	15	-
72	316 Ti	560	270	750	15	-
73	316 L	580	310	750	15	-
74	321	600	280	730	15	-
75	347	520	200	730	15	-
76	304 LN	570	270	730	15	-
77	304 L	570	265	730	15	-
78	304 L	570	265	730	15	-
79	20 Cb	655	310	1039	17.24	179
80	348	621	276	730	15.91	170
81	321	586	241	720	16.08	160
82	316 L	552	207	724	16.08	160
83	303 SE	621	241	721	16.25	170

## Продовження таблиці А.1

84	X2CrNiMo 18164	585	240	740	16.2	-
85	X2CrNiMo 17133	620	310	740	16.2	-
86	X25CrNi2520	620	310	770	17.5	-
87	X5CrNi1810	515	205	722	16.2	-
88	X12CrNi177	515	205	720	16.2	-
	<b>Дуплексні сталі</b>					
89	SAF 2205SH	2200	1800	840	14	-
90	SAF 2205	1450	1235	840	14	-
91	SAF 2205	1700	1530	850	14	-
92	SAF 2507	830	590	800	15	-
93	S32760	805	507	800	15	-
94	S31803	750	510	800	15	-
95	S32304	670	450	800	15	-
96	S32101	700	480	800	15	-
97	S32520	770	550	850	17	260
98	S32205	720	510	800	17	-
99	S31803	680	460	800	17	220
100	S32304	600	400	800	17	200
	<b>Феритні сталі</b>					
101	446-1	500	275	690	20	190
102	1C356	440	270	930	19	215
103	1C256	400	250	750	21	196
104	1802	500	330	600	22	-
105	Kanthal AF	680	470	1390	11	230
106	Kanthal LT	750	550	1230	16	230
107	Kanthal A	660	450	1390	11	230
108	Kanthal A-1	680	475	1450	11	230
109	Kanthal D	630	470	1350	11	220
110	Kanthal AF	650	470	1390	11	230
111	Kanthal A-1	670	460	1450	11	225
112	Alkrothal 720	550	420	1200	16	220
113	Alkrothal 14	550	420	1250	16	200
114	Alkrothal 3	500	350	1120	16	200
115	Kanthal DT	720	555	1370	11	225
116	Kanthal D	725	550	1350	11	220
117	Kanthal A	725	505	1390	11	230
118	4742	535	375	910	16	212
119	4724	515	340	920	15.7	192
120	4713	475	320	710	20.5	192
121	430	520	380	600	25	-
122	4742	555	405	1020	14.2	223
123	AL 453	470	310	733	19.2	-
124	430	538	386	600	23.9	-
125	A536	496	345	500	32.3	170

## Продовження таблиці А.1

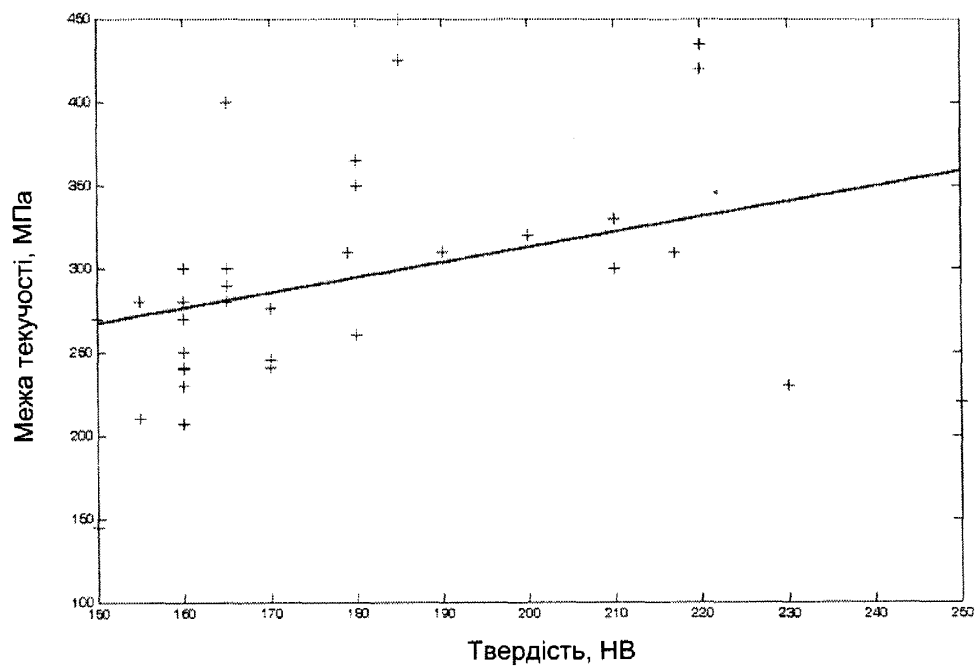
126	A536	414	276	500	32.3	140
	<b>Мартенситні сталі</b>					
127	420	650	500	550	30	-
128	X4Cr Ni Mo 16-5-1	850	615	750	20	300
129	41500	750	560	800	26	220
130	S41000	650	450	600	25	190
131	A536	550	400	600	25	160
132	S41000	827	621	600	15.22	300
133	420	650	500	550	30	-
134	X4Cr Ni Mo 16-5-1	850	615	750	20	230
135	S41500	750	560	800	26	220
136	S41000	650	450	600	25	190
137	S41000	550	400	600	25	160
138	17Cr-4Ni	931	862	770	17.9	332
139	15-5	862	641	770	17.9	332
140	420	586	276	550	24.9	-
141	X20Cr13	1720	1480	600	30	-
142	X10Cr13	485	275	570	24.9	-

<http://www.matweb.com/>

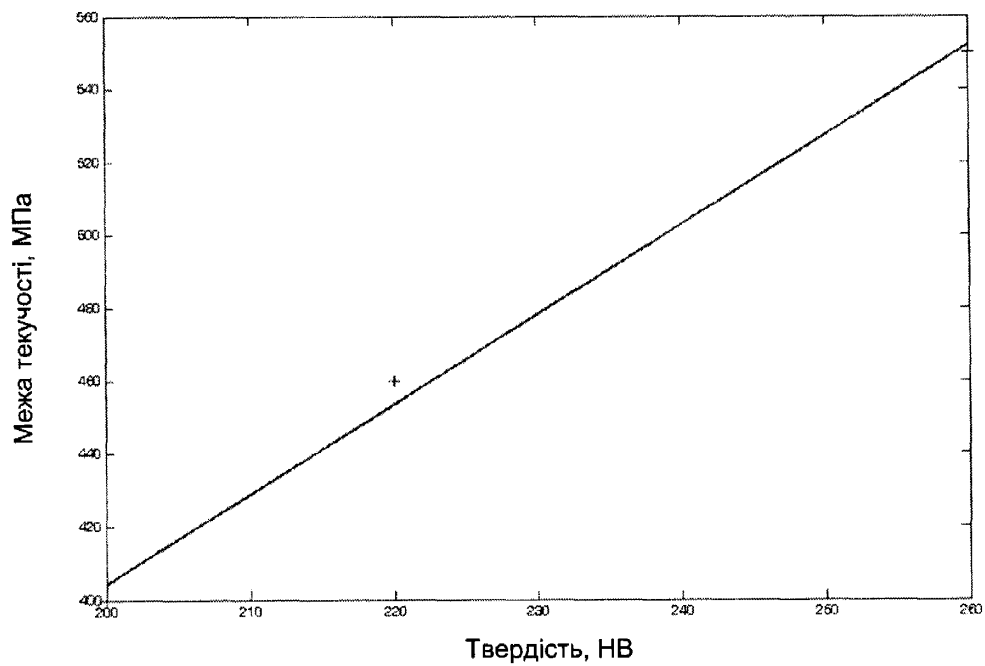


## Додаток Б

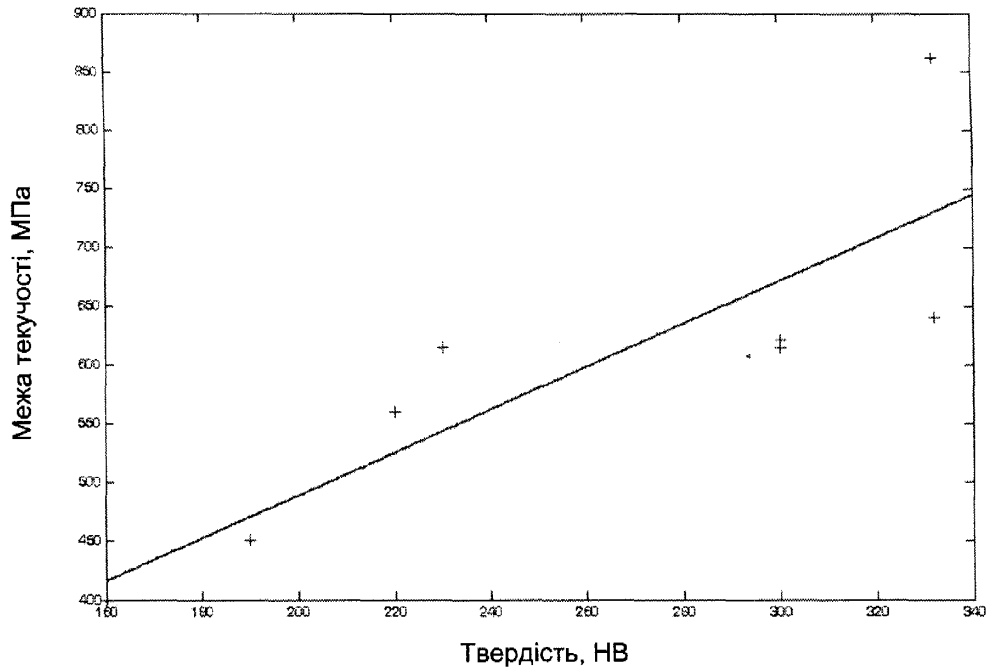
Графічні залежності границі плинності від інформативних параметрів для різних типів структур



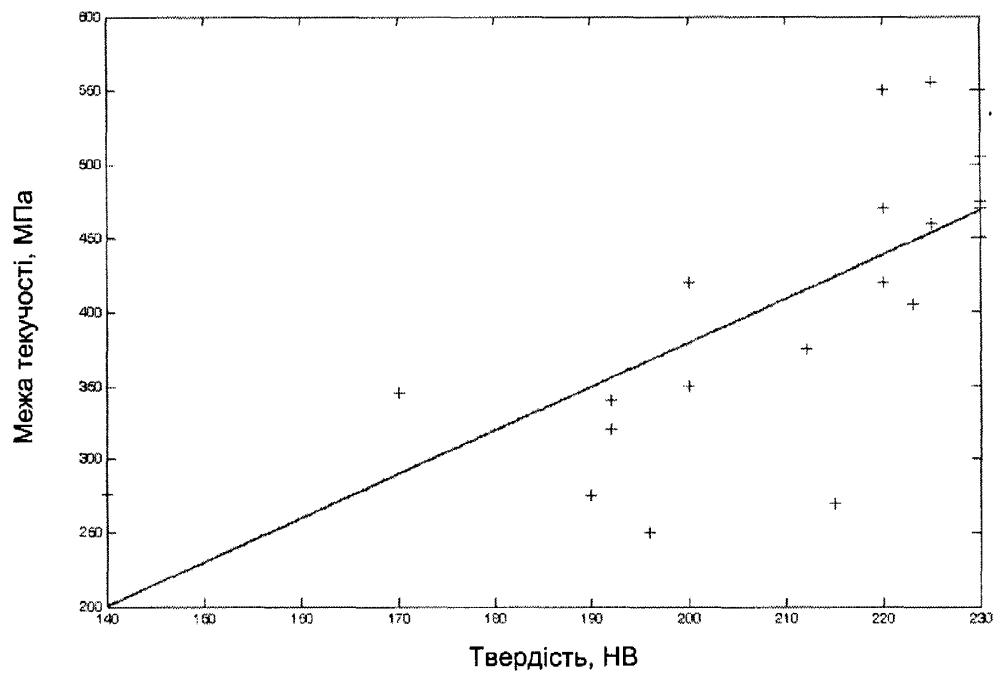
а)



б)



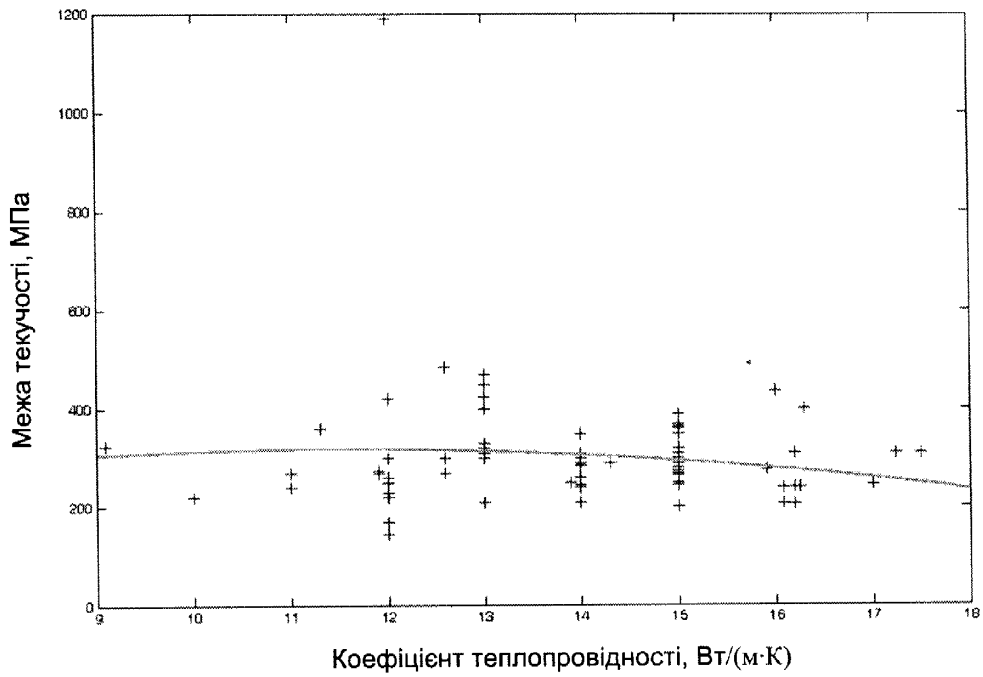
в)



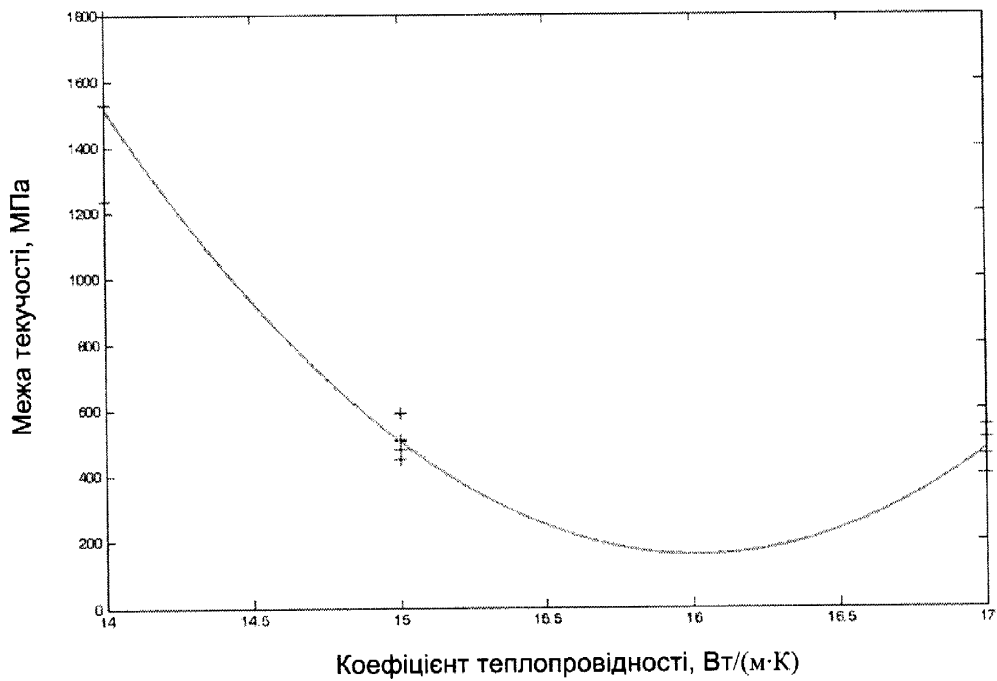
г)

а) – аустенітні сталі; б) – дуплексні сталі; в) – мартенситні сталі; г) – феритні сталі

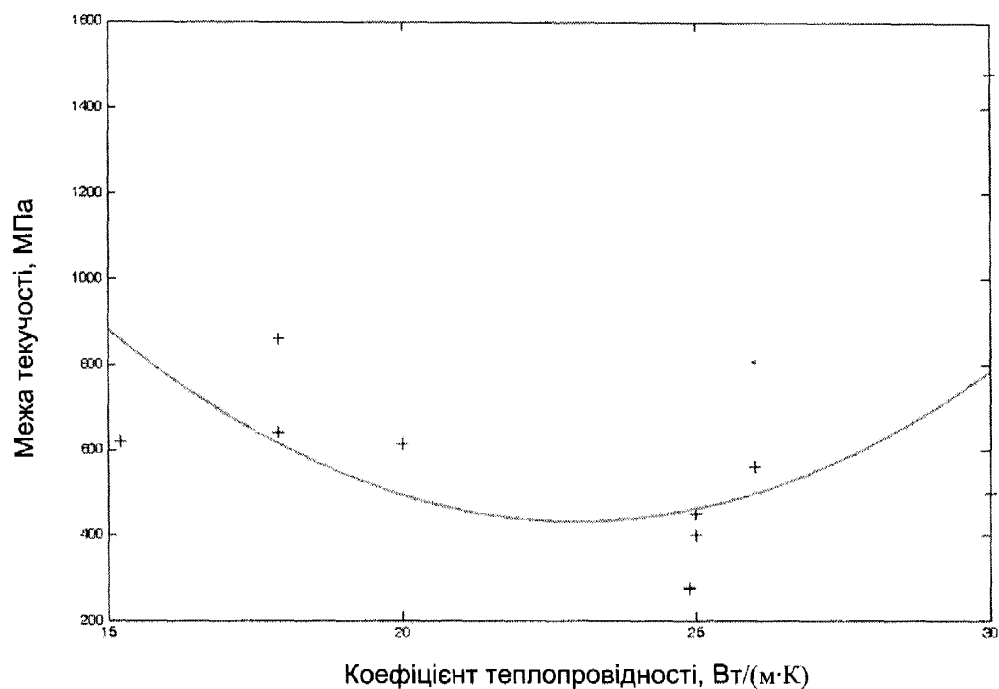
Рис. Б.1. Графічні залежності границі плинності від твердості для всіх типів структур



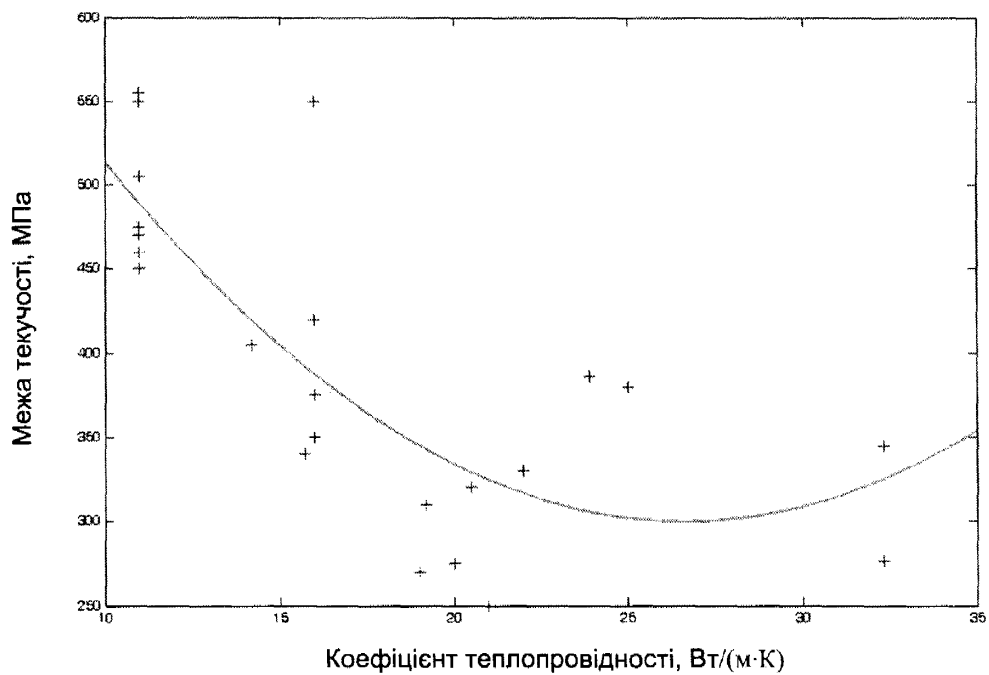
а)



б)



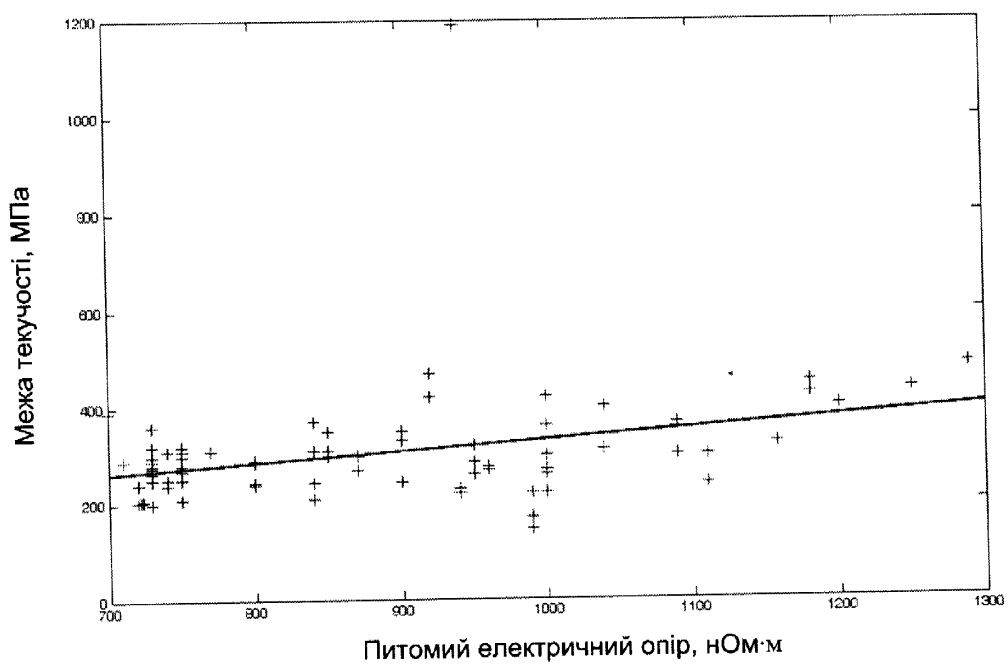
в)



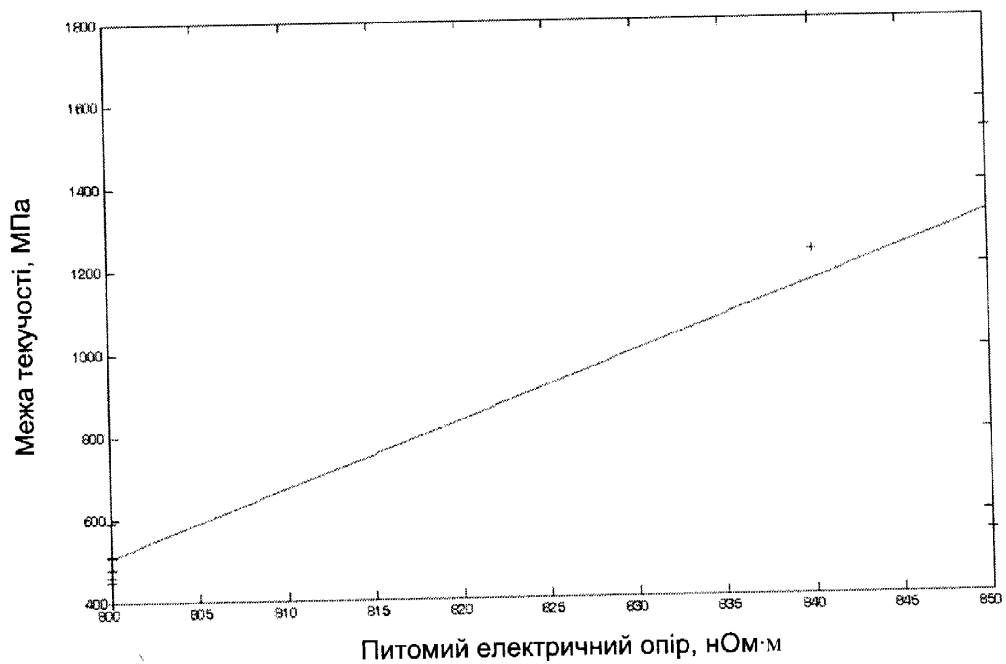
г)

а) – аустенітні сталі; б) – дуплексні сталі; в) – мартенситні сталі; г) – феритні сталі

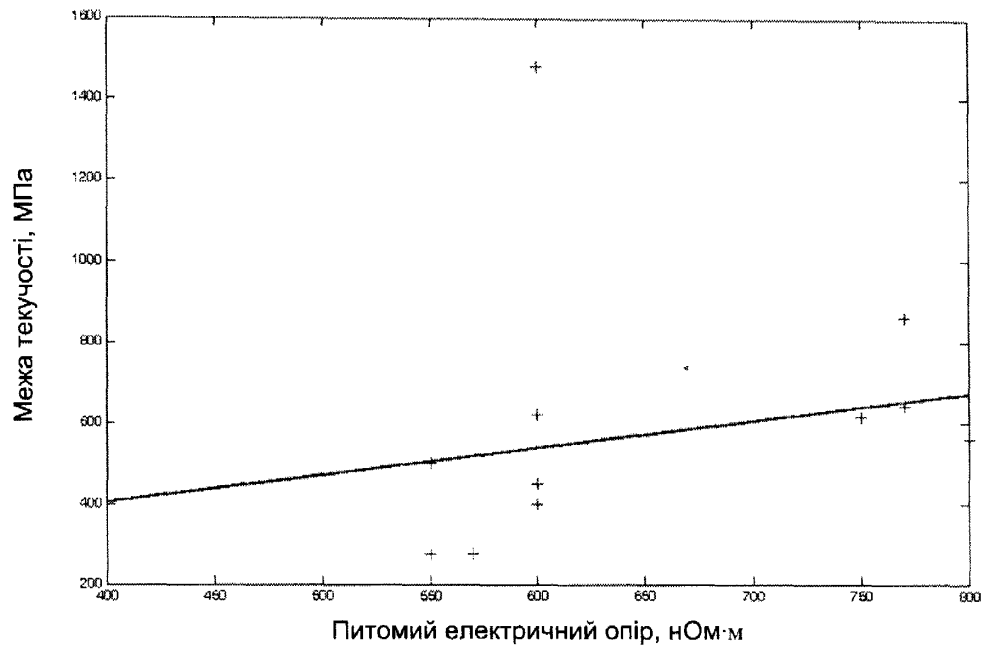
Рисунок Б.2. Графічні залежності границі плинності від коефіцієнта теплопровідності для всіх типів структур



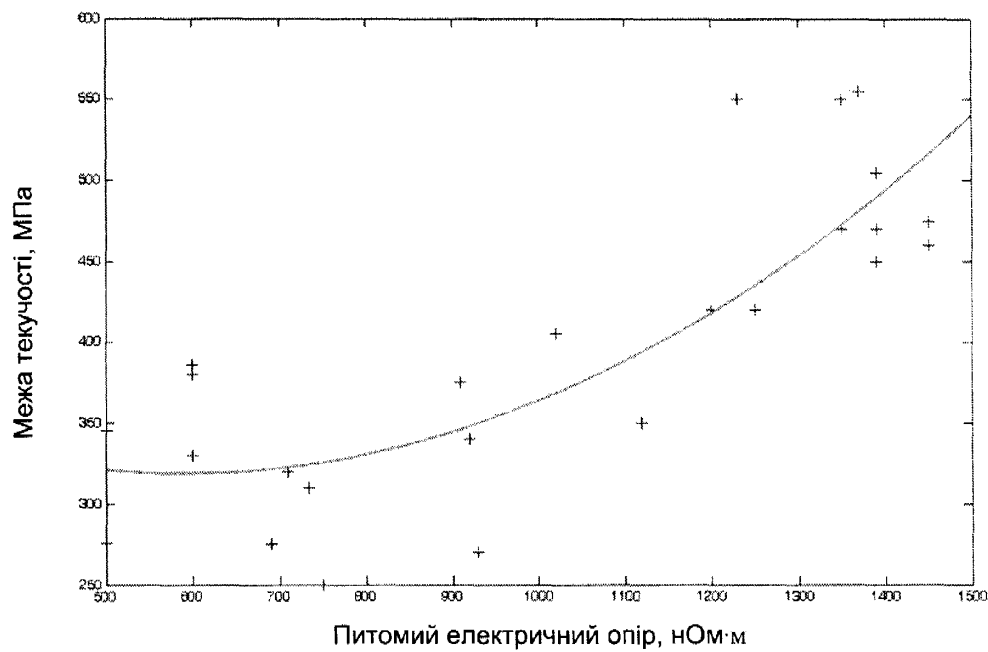
а)



б)



в)



г)

а) – аустенітні сталі; б) – дуплексні сталі; в) – мартенситні сталі; г) – феритні сталі

Рис. Б.3. Графічні залежності границі плинності від питомого електричного опору для всіх типів структур

(11) **87240**(19) **UA**(51) МПК (2009)  
G01N 25/02  
G01N 11/00  
G01N 33/20

<p>(21) Номер заявки: <b>а 2008 02389</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>25.02.2008</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: <b>25.06.2009</b></p> <p>(41) Дата публікації відомостей про заявку та номер бюлетеня: <b>10.03.2009, Бюл. № 5</b></p> <p>(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: <b>25.06.2009, Бюл. № 12</b></p>	<p>(72) Винахідники: <b>Карпаш Максим Олегович, UA, Доценко Євген Романович, UA, Карпаш Олег Михайлович, UA</b></p> <p>(73) Власник: <b>ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, UA</b></p>
--	---

(54) Назва винаходу:

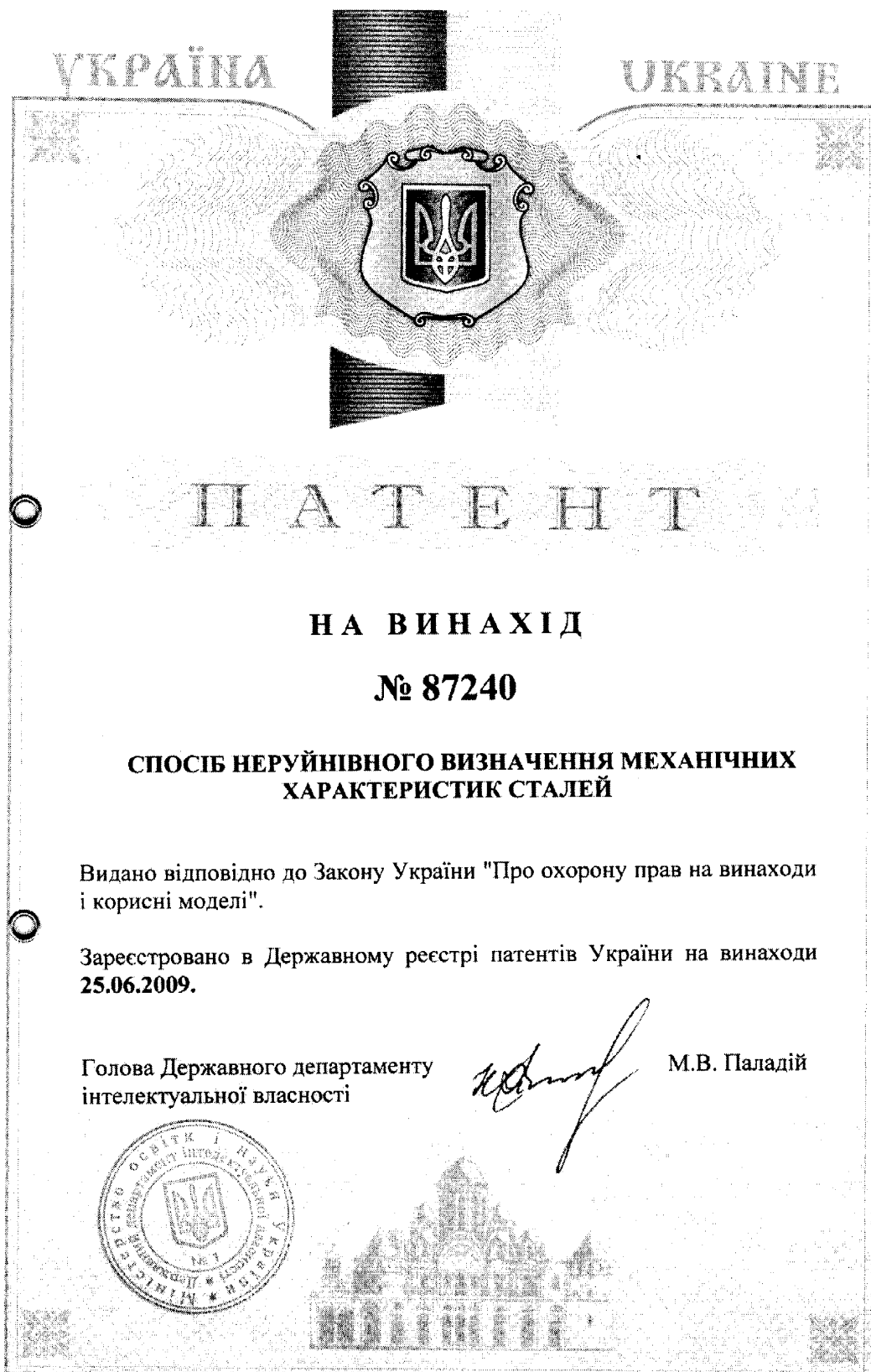
**СПОСІБ НЕРУЙНІВНОГО ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ**

(57) Формула винаходу:

Спосіб неруйнівного визначення механічних характеристик сталей, який включає вимірювання питомого електричного опору, твердості поверхневого шару сталі, коефіцієнта теплопровідності і визначення розрахункових значень механічних характеристик сталей, який відрізняється тим, що за значеннями добутку питомого електричного опору та коефіцієнта теплопровідності визначають належність контрольованої сталі до тої чи іншої структурної групи сталей, а потім за допомогою алгоритмів штучних нейронних мереж отримують розрахункові значення механічних характеристик сталей.

Додаток В

Патент на винахід способу неруйнівного визначення механічних характеристик  
сталей





(11) 87240

Пронумеровано, прошито металевими  
люверсами та скріплено печаткою  
2 арк.  
25.06.2009



Уповноважена особа

---

(підпис)



УКРАЇНА

(19) UA (11) 87240 (13) C2  
 (51) МПК (2009)  
 G01N 25/02  
 G01N 11/00  
 G01N 33/20

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
 І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ НЕРУЙНІВНОГО ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ

1

(21) а200802389  
 (22) 25.02.2008  
 (24) 25.06.2009  
 (46) 25.06.2009, Бюл.№ 12, 2009 р.  
 (72) КАРПАШ МАКСИМ ОЛЕГОВИЧ, ДОЦЕНКО ЄВГЕН РОМАНОВИЧ, КАРПАШ ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ  
 (73) ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ  
 (56) UA, 75949, C2, 15.06.2006  
 SU, 1260790, A1, 30.09.1986  
 JP, 57029947, A, 18.02.1982  
 US, 6197130, B1, 06.03.2001

2

(57) Спосіб неруйнівного визначення механічних характеристик сталей, який включає вимірювання питомого електричного опору, твердості поверхневого шару сталі, коефіцієнта теплопровідності і визначення розрахункових значень механічних характеристик сталей, який відрізняється тим, що за значеннями добутку питомого електричного опору та коефіцієнта теплопровідності визначають належність контрольованої сталі до тої чи іншої структурної групи сталей, а потім за допомогою алгоритмів штучних нейронних мереж отримують розрахункові значення механічних характеристик сталей.

Винахід відноситься до неруйнівного контролю сталей, зокрема до контролю фізико-механічних характеристик сталей.

Відомий спосіб магнітного контролю механічних властивостей феромагнітних виробів [1], який використовується для неруйнівного контролю твердості феромагнітних виробів; при цьому підвищується точність контролю за рахунок зниження енерговитрат на контроль виробів - це досягається шляхом намагнічування виробу магнітним полем, вимірюванням магнітного параметру, в якості якого використовують коерцитивну силу або залишкову магнітну індукцію, по величині якої судять про досліджувані властивості. Проте цей спосіб придатний тільки для контролю феромагнітних виробів, що значно обмежує його застосування. Недоліком є також і те, що коерцитивна сила і залишкова магнітна індукція є структурно чутливими анізотропними параметрами, що впливатиме на точність і достовірність результатів контролю цим способом. Цей спосіб відноситься до контролю тільки одного механічного параметра - твердості, по якому не завжди можливо судити про механічні характеристики матеріалу і який часто є характеристикою тільки поверхневого шару матеріалу.

Існує, також, неруйнівний спосіб визначення механічних властивостей сталі [2]. Спосіб включає визначення хімічного складу сталі, спеціальне вилання зразка, а при його охолодженні,

вимірювання через певні проміжки часу температури і електричного опору його теплового центру, які використовують для побудови комплексної термограми. З врахуванням змін хімічного складу і параметрів кривих електроопору і температури складають рівняння регресії, за якими розраховують характеристики механічних властивостей. Недоліком даного способу є необхідність визначення хімічного складу, що зазвичай є дорогою і трудомісткою процедурою.

Найбільш близьким по технічній суті до запропонованого є неруйнівний спосіб визначення механічних властивостей сталі [3], який полягає у послідовному вимірюванні електричного опору, твердості поверхневого шару металу і коефіцієнта теплопровідності, а для отримання розрахункових значень механічних характеристик сталей використовують штучну нейронну мережу, яка служить апроксиматором механічної характеристики (межі міцності) як багатометричної функції комплексу згаданих параметрів. Недоліком даного способу є використання для тренування штучної нейронної мережі даних по марках сталей, які відносяться до різних типів структур, що призводить до неадекватності результатів розрахунку значень механічних характеристик.

Задача даного винаходу полягає у підвищенні точності визначення межі текучості як функції комплексу параметрів твердості, теплопровідності та питомого електричного опору шляхом вра-

(19) UA (11) 87240 (13) C2

3

87240

4

ування належності матеріалу контрольованого об'єкта до тієї чи іншої структурної групи сталі.

Для вирішення поставленої задачі пропонується спосіб неруйнівного визначення механічних характеристик сталей контрольованого об'єкту, що полягає у вимірюванні питомого електричного опору, твердості поверхневого шару металу, коефіцієнту теплопровідності і визначенні розрахункових значень механічних характеристик, який відрізняється тим, що за значеннями добутку питомого електричного опору та коефіцієнту теплопровідності визначають належність матеріалу контрольованого об'єкту до тої чи іншої структурної групи сталі, а потім за допомогою алгоритмів штучних нейронних мереж отримують розрахункові значення механічних характеристик сталей.

Спосіб передбачає локальне послідовне вимірювання твердості, питомого електричного опору та коефіцієнта теплопровідності. Далі розраховують добуток значень питомого електричного опору та коефіцієнта теплопровідності. За цим значенням визначають належність матеріалу контрольованого об'єкта до структурної групи сталі. Для кожної структурної групи тренується нейронна мережа, придатна для розрахунку механічних характеристик (наприклад, межі текучості) тільки для цієї структурної групи.

Для перевірки запропонованого способу використані довідникові значення [4] для 142 іноземних марок сталей різних типів структур, які об'єднані в наступні групи:

1) аустенітно-дуплексна структурна група (використано 114 марок сталей);

2) феритно-мартенситна структурна група (використано 28 марок сталей);

В межах кожної структурної групи для всіх марок сталей, було розраховано коефіцієнт  $K_i$ .

$$K_i = \rho_i \cdot \lambda_i$$

та розраховано середнє значення  $K_{сєр}$  для двох структурних груп:

$$K_{сєр} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$$

де  $\rho_i$  - питомий електричний опір  $i$ -ї марки сталі, Ом·м;  $\lambda_i$  - коефіцієнт теплопровідності  $i$ -ї марки сталі,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ ;  $n$  - кількість марок сталей в структурній групі.

Результати розрахунку усередненого коефіцієнта  $K_{сєр}$  наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку коефіцієнта  $K_{сєр}$ 

№	Структура група сталей	Значення коефіцієнта $K_{сєр} \cdot 10^{-6}$	Діапазон значень коефіцієнта $K_{сєр} \cdot 10^{-6}$
1	Аустенітно-дуплексна	12,30	9,9-13,6
2	Мартенситно-феритна	15,45	13,7-18,0

З таблиці 1 видно, що значення коефіцієнта  $K_{сєр}$  відрізняється для різних структурних груп сталей.

Враховуючи складний характер залежностей між вхідними параметрами та механічними характеристиками [5] пропонується використовувати алгоритми штучних нейронних мереж [6], які слугуватимуть апроксиматорами межі текучості як нелінійної багатопараметричної функції комплексу параметрів твердості, питомого електричного опору та коефіцієнта теплопровідності в межах кожної структурної групи. Алгоритми нейронних мереж передбачають процедуру так званого "навчання" і тестування правильності навчання, для чого з усіх марок сталей було сформовано три окремих набори тренувальних та тестових даних: 1-й набір включає в себе аустенітні та дуплексні

сталі, що входять до першої структурної групи (кількість марок для тренування мережі - 90, для тестування - 5); 2-й набір включає в себе феритні та мартенситні сталі, що входять до другої структурної групи (кількість марок для тренування мережі - 37, для тестування - 3); 3-й набір включає в себе сталі всіх типів структур (кількість марок для тренування мережі - 127, для тестування - 8).

Числові дані восьми марок сталі, вибраних для тестування, не використовувались при навчанні і були невідомими для мережі - таким чином відбувалось моделювання процесу контролю.

Для перевірки можливості здійснення винаходу було виконані дослідження, результати яких представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

## Результати тестування натренованих нейронних мереж

Сталь		1	2	3	4	5	6	7	8	Похибка тестування	
										МПа	%
Набір даних	Дійсні значення межі текучості	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

З таблиці 2 видно, що точність визначення межі текучості для окремих структурних груп в 2-3 рази вища за точність визначення в групі, яка включає всі типи структур.

Аналіз результатів перевірки запропонованого способу на довідкових даних однозначно вказує на те, що запропонований спосіб визначення механічних характеристик сталей в межах груп із однаковою або схожою структурами дозволяє суттєво підвищити точність контролю.

Таким чином, на реальних значеннях фізичних і механічних характеристик ряду конструкційних сталей підтверджена можливість здійснення запропонованого винаходу.

Перелік посилань

1. Патент Росії №2051380 G01 N27/80.

2. Патент СРСР № 1260790 G 01N 25/02.

3. Патент. UA 75949 Україна, МІЖ G 01N 25/02. Спосіб неруйнівного контролю механічних характеристик сталей / Карпаш О.М., Карпаш М.О., Райтер П.М., Ващишак С.П. (Україна). - Опубл. 15.06.2006; Бюл. № 6, 2006.

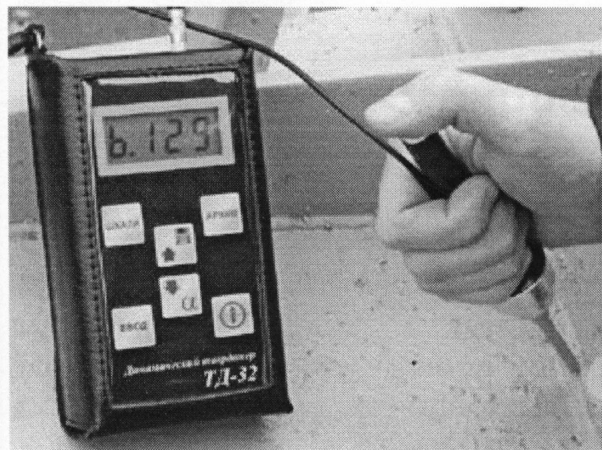
4. <http://www.matweb.com>.

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. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. - М.: Вильямс, 2006. - 1104 с.

## Додаток Г

## Динамічний твердомір ТД-32

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ТВЕРДОМЕРЫ ТД-32, ТД-32М**

Предназначены для оперативного измерения твердости промышленных изделий динамическим методом по шкалам Бринелля, Роквелла, Виккерса. Все шкалы запрограммированы для сталей.

Твердомеры могут быть использованы во всех отраслях промышленности, производственных и лабораторных условиях в ремонтных, монтажных организациях для измерений твердости и диагностики остаточного ресурса металла сосудов давления различного назначения, толстостенных трубопроводов, деталей машин и оборудования, промышленных полуфабрикатов (отливки, поковки, листы, трубы), сварных швов и др.

Модификация **ТД-32М** отличается от полной версии прибора **ТД-32** упрощенной комплектацией и отсутствием памяти. Измерительные характеристики остаются неизменными.

Программное обеспечение прибора дает возможность измерять твердость сталей, а также (при наличии градуировочных мер твердости) чугунов, цветных металлов и их сплавов, резины и т.д.

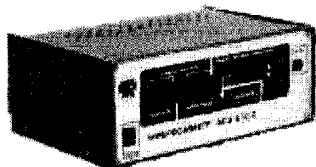
**Технические характеристики**

<b>Диапазоны измерений твердости по шкалам :</b>	
Роквелла, HRC	<b>20 - 68</b>
Бринелля, HB	<b>95 - 460</b>
Виккерса, HV	<b>95 - 950</b>
<b>Погрешность показаний прибора:</b>	
По Роквеллу	<b>3 HRC</b>
По Бринеллю	<b>3 - 5 %</b>
По Виккерсу	<b>5 %</b>
Шероховатость поверхности не более, Ra	<b>2,5</b>
Потребляемый ток, mA не более	<b>12</b>
Время до автоматического выключения, мин	<b>3</b>
Минимальная масса изделий, кг	<b>2*</b>
Минимальная толщина изделия в точке измерения, мм	<b>10*</b>
Количество запоминаемых результатов	<b>4000</b>
Количество измерений для усреднения	<b>3 -10</b>
Габаритные размеры, мм	<b>145x82x32</b>
Рабочий диапазон температур, ° C	<b>от -5 до + 40</b>
Питание	<b>батарея 6F22 (КРОНА) или аккумулятор</b>
Масса электронного блока с батареей, не более, кг	<b>0,35</b>

\* возможны измерения твердости деталей с плоскими поверхностями, массой менее 2 кг и толщиной менее 10 мм, после их притирки густой смазкой на массивную металлическую плиту.

## Додаток Д

## Микроомметр БСЗ-010-2

**Микроомметр БСЗ-010-2**

Микроомметр БСЗ-010-2 предназначен для измерения малых и сверхмалых сопротивлений в лабораторных и цеховых условиях. Диапазон измерений от 10 нОм до 1 Ома с погрешностью < 0,2%. Помехозащищен.

Микроомметр предназначен для измерения в лабораторных условиях малых значений активного электрического сопротивления. Микропроцессорный прибор с цифровой индикацией позволяет работать в режимах много- и однократных измерений, проверять надёжность контактирования с объектом и производить автокалибровку по внешним эталонам.

- Более десяти лет применения на предприятиях и в учебных заведениях России подтвердили надёжность, высокие метрологические и эксплуатационные показатели микроомметра БСЗ-010-2.
- Сравнительные испытания БСЗ-010-2 с лучшими образцами микроомметров отечественного и зарубежного производства показали его преимущества по основным параметрам.

**Технические характеристики микроомметра БСЗ-010-2**

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых сопротивлений	10 нОм...1 Ом
Основная приведенная погрешность, %, не более	0,05...0,1
Измерительный ток, А, не более	3,0
Длина входных кабелей, м	3,0
Диапазон рабочих температур, °С	+10 ...+40
Питание прибора от сети частотой 50 Гц, В	220
Потребляемая мощность, Вт, не более	90
Габаритные размеры, мм	320×220×125
Масса, кг, не более	5,0

- Время одного измерения составляет не более 2-х секунд.
- Диапазон измерения разбит на четыре поддиапазона.
- Паспорт микроомметра содержит подробную инструкцию по поверке прибора.

<http://eurosvyaz.com.ua/products/product/528/Mikroommetr-BSZ-010-2.html>

## Додаток Е

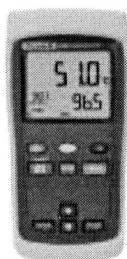
## Цифровой термометр Fluke 54-II

FLUKE®

## Термометры модели 50 серии II



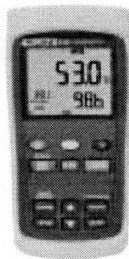
Fluke 54 II



Fluke 51 II



Fluke 52 II



Fluke 53 II



## Принадлежности, входящие в комплект поставки

Защитный футляр.  
 Два шаровых зонда-термопары 80PK-1 (54 и 52).  
 Один шаровой зонд-термопара 80PK-1 (51 и 53).

## Информация по заказу

Термометр Fluke 51 II.  
 Термометр Fluke 52 II.  
 Термометр Fluke 53 II.  
 Термометр Fluke 54 II.

## Лабораторная точность в любых условиях

Термометры Fluke 50 серии II - прочные портативные приборы, обеспечивающие лабораторную точность измерений (0,05%+0,3°C).

- Большой дисплей с подсветкой показывает любое сочетание T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> (только 52 & 54), T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub> (только 52 & 54), а также минимальное, максимальное или среднее значение.
- Часы относительного времени для минимального, максимального и среднего значения обеспечивают определение времени основных событий.
- Функция электронной коррекции обеспечивает компенсацию погрешности термопары, что повышает общую точность измерений.
- Показания в °C, °F или в Кельвинах (K).
- Режим ожидания увеличивает срок службы батарей.
- Крышка отсека батарей позволяет менять батареи без нарушения поверочной пломбы.

Дополнительные особенности моделей 53 и 54 серии II:

- Регистрация до 500 результатов измерений с регулируемым пользователем интервалом регистрации.
- Часы реального времени регистрируют точное время дня, когда произошло событие.
- Функция повторного вызова обеспечивает простоту анализа зарегистрированных данных на дисплее прибора.
- Инфракрасный порт передачи данных и поставляемое по отдельному заказу программное обеспечение FlukeView® Temperature.

## Функции

	51 II	52 II	53 II	54 II
Тип термопары	J,K,TE	J,K,TE	J,K,TE,N,R,S	J,K,TE,N,R,S
Количество входов	один	два	один	два
Матри времени	относительно	относительно	реальное время	реальное время
Защита от брызг/пыли	•	•	•	•
Двойной дисплей с подсветкой	•	•	•	•
Регистр. мин./макс./средн. значений	•	•	•	•
Вычисление истинной разницы (T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub> )	•	•	•	•
Регистрация до 500 резулт. измерений			•	•
Инфракрасный порт для связи с компьютером			•	•
Совместимость с отдельно поставляемым программным обеспечением FlukeView			•	•

## Технические характеристики

Диапазоны измеряемых температур:	
Термопара J-типа	от -210 °C до 1200 °C (от -346 °F до 2192 °F)
K-типа	от -200 °C до 1372 °C (от -328 °F до 2501 °F)
T-типа	от -250 °C до 400 °C (от -418 °F до 752 °F)
E-типа	от -150 °C до 1000 °C (от -238 °F до 1832 °F)
N-типа**	от -200 °C до 1300 °C (от -328 °F до 2372 °F)
R** и S-типа**	от 0 °C до 1767 °C (от 32 °F до 3212 °F)
Точность измерений температуры	
Выше -100 °C (-148 °F):	
J, K, T, E, и N-тип**	± [0,05% + 0,3 °C (0,5 °F)]
R** и S-тип**	± [0,05% + 0,4 °C (0,7 °F)]
Ниже -100 °C (-148 °F):	
J, K, E, и N-тип	± [0,20% + 0,3 °C (0,5 °F)]
T-тип	± [0,50% + 0,3 °C (0,5 °F)]

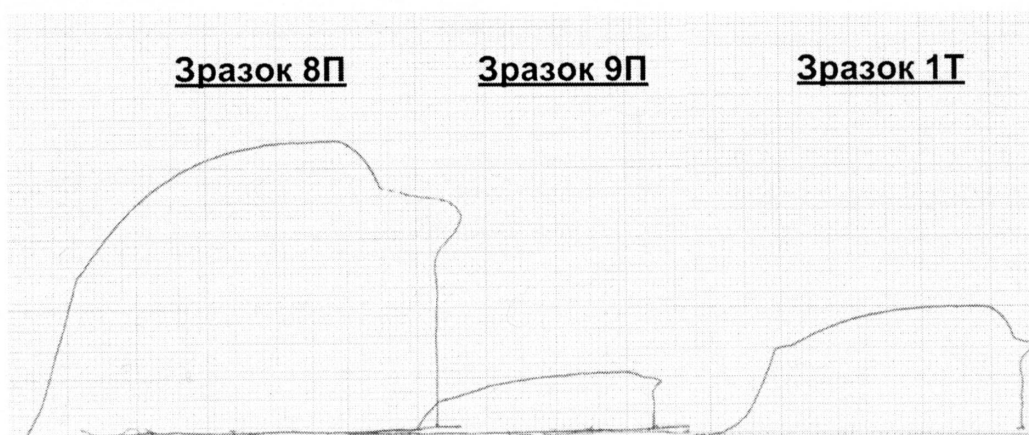
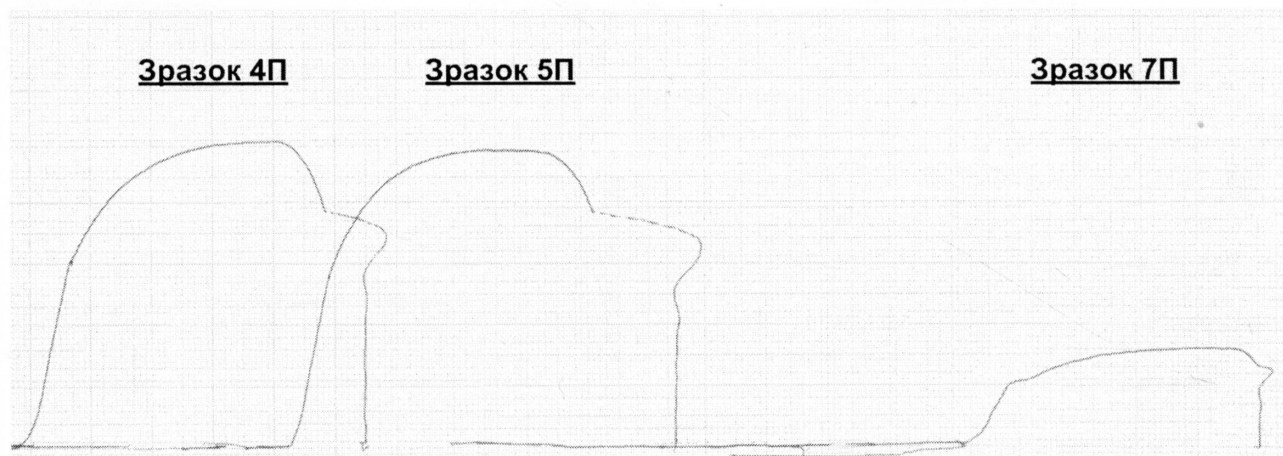
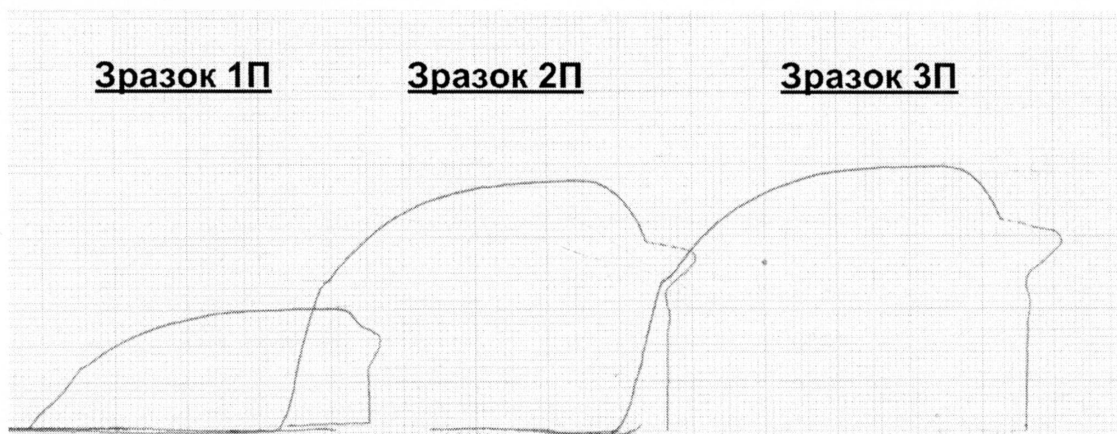
\*\* Измерение температуры с помощью термопар типа N, R и S возможно только с помощью моделей Fluke 53 и 54.

Масса: 0,4 кг  
 Гарантийный срок - три года.

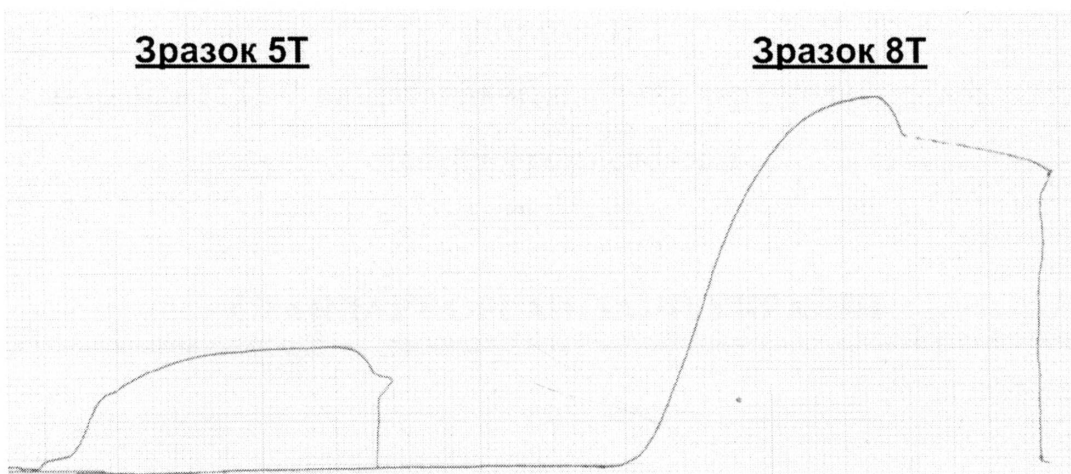
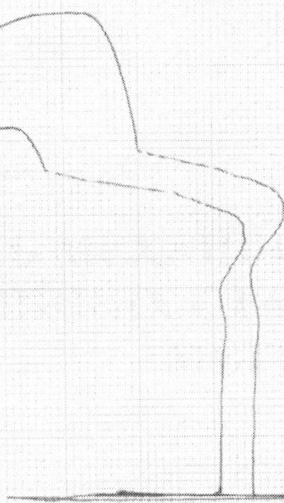
Срок службы батареи: обычно 1000 ч, АА.  
 Размеры (выс. x шир. x гл.): 173 мм x 86 мм x 38 мм.

## Додаток Ж

## Діаграми розтягу пропорційних зразків





Зразок 5ТЗразок 8ТЗразок 10ТЗразок 12ТЗразок 21Т

Додаток И

Проект методики (СОУ) визначення механічних характеристик конструкційних сталей в промисловості

Проект

**СТАНДАРТ ОРГАНІЗАЦІЇ УКРАЇНИ**

---

**КОНТРОЛЬ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ В ПРОМИСЛОВОСТІ.  
МЕТОДИКА**

СОУ \_\_\_\_\_

---

## ЗМІСТ

1. Сфера застосування.....	1
2. Нормативні посилання.....	1
3. Терміни та визначення понять .....	2
4. Позначки та скорочення .....	3
5. Загальні положення.....	3
6. Вимоги до організацій та персоналу, які здійснюють контроль механічних характеристик сталей.....	3
7. Вимоги охорони праці під час проведення робіт з контролю механічних характеристик сталей.....	4
8. Аналіз технічної та оперативної документації щодо об'єкту контролю.	5
9. Вимоги до апаратури.....	5
10. Обсяг та види контрольних операцій перед проведенням робіт з визначення механічних характеристик сталей.....	6
11. Організація робіт та підготовка до проведення контролю механічних характеристик сталей.....	9
12. Методика контролю механічних характеристик сталей.....	9
13. Оброблення результатів.....	14
Додатки:	
Додаток А Апаратура, рекомендована для використання під час проведення неруйнівного контролю механічних характеристик сталей.....	16
Додаток Б Форма протоколу оформлення результатів контролю фізико-механічних характеристик сталевих конструкцій.....	17
Додаток В Бібліографія.....	19

## ПЕРЕДМОВА

**1. РОЗРОБЛЕНО:** Івано-Франківським національним технічним університетом нафти і газу

**РОЗРОБНИКИ:** Карпаш О.М., д.т.н., Доценко Є.Р., Карпаш М.О., к.т.н., Яворський А.В., к.т.н.

**2. ВНЕСЕНО**

**3. ПОГОДЖЕНО** Технічний комітет стандартизації ТК 78 „Технічна діагностика та неруйнівний контроль”, ТК 146 „Матеріали, обладнання та споруди для нафтогазової промисловості”

**4. ПРИЙНЯТО та НАДАНО ЧИННОСТІ** Наказом

**5 ВВЕДЕНО ВПЕРШЕ**

# СТАНДАРТ ОРГАНІЗАЦІЇ УКРАЇНИ

---

---

## КОНТРОЛЬ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ В ПРОМИСЛОВОСТІ

Методика

## КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Методика

---

---

Чинний від \_\_\_\_\_

---

---

### 1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

Цей стандарт поширюється на трубопроводи усіх типорозмірів, горизонтальні резервуари, труби нафтогазового сортаменту та інші сталеві конструкції в основних галузях промисловості.

Цей стандарт установлює порядок проведення контролю фізико-механічних характеристик сталей, за результатами якого прийматимуться рішення щодо відповідності обладнання нормам безпеки, величини залишкового ресурсу обладнання і термінів наступного контролю.

Цей стандарт призначений для спеціалістів організацій, що здійснюють контроль за фактичним технічним станом сталевих об'єктів в промисловості.

### 2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

ДСТУ 2389-94 Технічне діагностування та контроль технічного стану.

Терміни та визначення

ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення

ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення

ДСТУ 2865-94 Контроль неруйнівний. Терміни та визначення

ДСТУ 1.1-2001 Національна стандартизація. Стандартизація та суміжні види діяльності. Терміни та визначення понять.

ДСТУ ISO/IEC 17020-2001 Загальні критерії щодо діяльності органів різного типу, що здійснюють інспектування

ДСТУ ISO/IEC 17025-2001 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій

ГОСТ 166-89 Штангенциркули. Технические условия

ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение

ГОСТ 4543-71 Прокат из легированной конструкционной стали.

Технические условия

ГОСТ 7502-98 Рулетки измерительные металлические. Технические требования

ГОСТ 7661-67 Глубиномеры индикаторные. Технические условия

ГОСТ 10243-75 Сталь. Методы испытания и оценки микроструктуры

ГОСТ 22761-77 Металлы и сплавы. Метод измерения твёрдости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия

ГОСТ 23479-79 Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования

ГОСТ 25706-83 Лупы. Типы, основные параметры. Общие технические требования

ГОСТ 30415-96 Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом

ГОСТ 30489-97 (EN 473-92). Квалификация и сертификация персонала в области неразрушающего контроля. Общие требования

РД 22-205-88 Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений грузоподъемных машин. Основные положения

### **3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ**

**3.1** В цьому стандарті використані такі терміни за ДСТУ 2389:

- технічне діагностування – визначення технічного стану об'єкта з означеною (заданою) точністю;

- технічний стан – стан, який характеризується в певний момент часу, за певних умов зовнішнього середовища значеннями параметрів, установлених технічною документацією на об'єкт;

- контроль (технічного стану) – перевірення відповідності значень параметрів об'єкта вимогам технічної документації та визначення на цій основі одного із заданих видів технічного стану в даний момент часу.

**3.2** В цьому стандарті використані такі терміни за ДСТУ 2865:

- неруйнівний контроль – контроль якості продукції, за якого не повинна бути порушена придатність щодо застосування із повним збереженням з самого початку закладених функцій;

- метод неруйнівного контролю – правила застосування певних прийомів та засобів випробувань, за якими не повинна бути порушена придатність об'єкта щодо застосування;

- методика неруйнівного контролю – організаційно-технічний документ, який встановлює порядок та правила неруйнівного контролю об'єкта.

**3.3** В цьому стандарті використані такі терміни за ДСТУ 2860:

- ресурс, технічний ресурс – сумарний наробіток об'єкта від початку його експлуатації чи поновлення після ремонту до переходу в граничний стан;

- залишковий ресурс – сумарний наробіток об'єкта від моменту контролю його технічного стану до переходу у граничний стан.

**3.4** В цьому стандарті використані такі терміни за ДСТУ 2681:

- точність вимірювання – головна характеристика якості вимірювання, що відображає близькість до нуля систематичної похибки вимірювання;

- збіжність (результатів) вимірювань – характеристика якості вимірювань, що відображає близькість повторних результатів вимірювань однієї й тієї ж величини в однакових умовах.

**3.5** В цьому стандарті використані такі терміни за ДСТУ 1.1:

- протокол випробування (контролю) - документ, що містить результати випробувань (контролю) та іншу інформацію стосовно них.

## **4 ПОЗНАКИ ТА СКОРОЧЕННЯ**

ФМХ – фізико-механічні характеристики;

ІВС – інформаційно-вимірювальна система.

## **5 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ**

**5.1** Для визначення механічних характеристик конструкційних сталей в даному стандарті використовуються електричний контроль (чотиризондовий метод) та твердометрія, проте також можуть бути використані інші методи (наприклад, коерцитиметричний) при умові наявності кореляційних залежностей між ФМХ та вимірюваними параметрами.

**5.2** Електричний контроль та контроль твердості застосовуються при умові наявності стійких парних або множинних імовірнісних співвідношень між механічними характеристиками та інформативними параметрами сталі.

Всі імовірнісні оцінки, використані в даному стандарті, використовуються при довірчій імовірності не нижче 0,95.

**5.3** Кореляційний зв'язок між інформативними параметрами та ФМХ визначається на кожному підприємстві на основі інформаційного масиву для кожної марки або групи сталей, що відрізняються, в основному, вмістом вуглецю.

## **6 ВИМОГИ ДО ОРГАНІЗАЦІЙ ТА ПЕРСОНАЛУ, ЯКІ ЗДІЙСНЮЮТЬ КОНТРОЛЬ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ**

**6.1** Право виконання робіт з неруйнівного контролю та оцінки фактичного технічного стану сталевих конструкцій мають організації (лабораторії), які акредитовані на технічну компетентність згідно з ДСТУ ISO/IEC 17025 та ДСТУ ISO/IEC 17020 і мають дозвіл Держнаглядохоронпраці України на право проведення вказаних робіт.

**6.2** Проводити неруйнівний контроль та оцінку фактичного технічного стану сталевих конструкцій мають право, як правило, фахівці (оператори) другого рівня, атестовані за ДНАОП 0.01-1.27, а також з урахуванням вимог європейського стандарту EN 473 (ГОСТ 30489), як за методами, що застосовуються, так і по технічній діагностиці. Кваліфікація фахівця та право на проведення певного виду контролю повинні підтверджуватись діючими посвідченнями встановленого взірця.

**6.3** Право надання висновку за результатами визначення механічних характеристик сталей надається фахівцям з неруйнівного контролю та технічної діагностики, атестованим за другим або третім рівнем кваліфікації в установленому порядку.

**6.4** До виконання робіт з неруйнівного контролю допускаються фахівці першого рівня кваліфікації під керівництвом фахівця більш високого рівня кваліфікації.

**6.5** Оператори повинні досконало володіти апаратурою та обладнанням, які використовуються для контролю, а також знати технічні вимоги до об'єкта контролю.

**6.6** Оператори повинні мати кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче другої.

## **7 ВИМОГИ ОХОРОНИ ПРАЦІ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ З КОНТРОЛЬ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ**

**7.1** Оператори, що здійснюють контроль механічних характеристик сталевих конструкцій, повинні регулярно проходити інструктажі з охорони праці, пожежної та електробезпеки і здавати іспити згідно з ДНАОП 0.00-1.21, НАОП 2.1.21-1.01.

**7.2** Апаратура, що використовується для проведення контролю механічних характеристик сталевих конструкцій, повинна відповідати вимогам чинних стандартів та нормативних документів з охорони праці. Перед використанням апаратури необхідно вивчити вказівки з її безпечної експлуатації.

**7.3** Перед підключенням апаратури до зовнішньої мережі живлення слід перевірити надійність заземлення та цілісність силових кабелів. Підключення (відключення) і заземлення апаратури на місці проведення контролю повинно здійснюватись з дозволу чергового електрика і в його присутності. Кабелі живлення та заземлення слід розміщувати таким чином, щоб виключити можливість їх пошкодження.

**7.4** Оператори, що здійснюють контролювання ФМХ сталевих конструкцій, повинні виконувати всі розпорядження особи, відповідальної за охорону праці на місці проведення робіт.

**7.5** Оператори повинні кожний раз проходити інструктаж з охорони праці на робочому місці на підприємстві, де буде проводитись неруйнівний контроль.

**7.6** Робочий одяг операторів повинен відповідати вимогам норм і правил безпеки.

## **8 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ТА ОПЕРАТИВНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ЩОДО ОБ'ЄКТУ КОНТРОЛЮ**

**8.1** Цей стандарт визначає перелік технічної та оперативної інформації про об'єкт контролю, яка повинна бути зібрана перед проведення досліджень на сталевих конструкціях в промисловості. До неї відноситься:



- паспорт обладнання, а в разі відсутності – марки та механічні характеристики матеріалів металоконструкцій (межа міцності, межа текучості);
- інформація про термін експлуатації об'єкта;
- відомості про аварії та відмови обладнання;
- результати усіх інших попередніх діагностичних обслідувань об'єктів, якщо вони проводилися;
- сертифікати на вироби (труби, елементи металоконструкцій тощо) та матеріали, з яких вони виготовлені.

**8.2** Інформація, необхідна для визначення ділянок на металоконструкціях, на яких повинен здійснюватися контроль механічних характеристик. В першу чергу контролюванню підлягають ділянки, на яких очікується надмірна або значна концентрація напружень в ході експлуатації металоконструкції. Такі ділянки також можуть бути визначені за результатами контролю напружено-деформованого стану елементів металоконструкцій – місця найбільших напружень.

## **9 ВИМОГИ ДО АПАРАТУРИ**

**9.1** Апаратура та засоби вимірювальної техніки, що використовуються перед і під час проведення контролю механічних характеристик сталей, повинна знаходитись під метрологічним контролем. Її придатність до використання повинна підтверджуватись свідоцтвами про метрологічну атестацію або повірку.

**9.2** Перелік апаратури, рекомендованої для проведення контролю ФМХ матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації, наведений в додатку А.

**9.3** Перед початком роботи працездатність та точність вимірювання засобів повинна бути перевірена на зразках для настроювання або іншими методами у відповідності до експлуатаційної документації на неї.

**9.4** В процесі проведення контролю збіжність результатів вимірювань підлягає періодичній перевірці на зразках для настроювання - через певне число вимірів або через певний час роботи апаратури (як правило, кожних чотири години), а також:

- після заміни функціональних блоків;
- після зміни типорозміру об'єкта контролю;
- у випадках, коли покази апаратури викликають сумніви;
- після виникнення ситуацій, які можуть впливати на точність показів.

## **10 ОБСЯГ ТА ВИДИ КОНТРОЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ ПЕРЕД ПРОВЕДЕННЯМ РОБІТ З ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ**

**10.1** Цей стандарт регламентує види і обсяги контролю перед проведенням робіт з визначення механічних характеристик конструкційних сталей у промисловості.

**10.2** Для контролю геометричних параметрів об'єктів та на предмет виявлення дефектів типу порушення суцільності необхідно застосовувати наступні методи контролю:

- візуально-оптичний контроль;
- інструментальний контроль;
- акустична дефектоскопія;
- акустична товщинометрія.

### **10.3 Візуально-оптичний контроль**

**10.3.1** Візуально-оптичний контроль металоконструкцій здійснюється з метою виявлення:

- явних поверхневих пошкоджень – тріщин, рисок, раковин, корозії, розшарування металу;
- суттєвих відхилень форми – загальних викривлень, деформації, скручування, непаралельності спряжених елементів та ін.;
- ділянок інтенсивного зносу;
- відповідності маркування даним сертифікатів.

Під час проведення візуально-оптичного контролю також перевіряється комплектність металоконструкцій.

**10.3.2** Під час візуально-оптичного контролю елементів металоконструкцій на наявність поверхневих пошкоджень контрольовані поверхні повинні мати достатню освітленість. Внутрішні та зовнішні поверхні, доступ до яких не обмежений, слід ретельно оглянути.

**10.3.3** Виявлені пошкодження та сумнівні місця необхідно позначити (обвести) крейдою. Розміри та вид дефектів необхідно уточнити за допомогою інших методів контролю (інструментального, неруйнівного). У випадку виявлення явних недопустимих дефектів (глибокі або протяжні тріщини, наскрізні отвори і т.п.) в тілі несучого елемента, які виключають використання елемента металоконструкції за прямим призначенням, він підлягає відбракуванню. У цьому випадку місцезнаходження дефекту позначається незмивною червоною фарбою.

**10.3.4** В обсяг візуально-оптичного контролю входить співставлення маркування елементів металоконструкцій з даними сертифікатів. Якщо маркування на елементі відсутнє, нерозбірливе або не відповідає даним сертифіката, його необхідно вилучити з експлуатації до визначення його дійсних характеристик.

Вимоги до проведення візуально-оптичного контролю викладені в ГОСТ 23479.

### **10.4 Акустична дефектоскопія елементів сталевих конструкцій довготривалої експлуатації**

**10.4.1** Акустична дефектоскопія проводиться з метою виявлення внутрішніх та поверхневих дефектів типу порушень суцільності металу

(тріщини, раковини, включення, непровари, пори та ін.) елементів металоконструкцій та визначення геометричних розмірів і координат виявлених дефектів.

Акустичній дефектоскопії підлягають ділянки елементів металоконструкцій, визначені у відповідності до п 10.3.3.

**10.4.2** Акустична дефектоскопія, як правило, реалізується за допомогою серійних ультразвукових приладів, наприклад, дефектоскопів типу УД2-12, УД2-70, ДІО-562, або аналогічних їм, технічні та метрологічні характеристики яких не гірші, ніж у наведених в переліку приладів.

**10.4.3** Методика акустичної дефектоскопії передбачає проведення попереднього настроювання ультразвукової апаратури на зразках для настроювання з штучними дефектами (РД 22-205).

**10.4.4** Настроювання апаратури слід здійснювати на відповідних зразках для настроювання, товщина яких відповідає товщині контрольованого елемента з використанням відповідних п'єзоперетворювачів.

**10.4.5** Проконтрольований елемент сталеві конструкції вважається придатним до проведення контролю фізико-механічних характеристик за умови номінальних навантажень, якщо на екрані дефектоскопа відсутні будь-які імпульси, крім зондуючого і не спрацьовує схема автоматичної сигналізації дефекту.

## **10.5 Визначення геометричних розмірів елементів металоконструкцій**

### **10.5.1 Інструментальний контроль елементів сталевих конструкцій**

**10.5.1.1** Інструментальний контроль здійснюється з метою:

- визначення розмірів поверхневих дефектів, виявлених під час візуально-оптичного контролю (вм'ятин, тріщин, корозійних ушкоджень);
- перевірки відповідності відхилень розмірів та форми елементів (погнутість, неплоскостність, непаралельність торців) вимогам нормативної документації.

**10.5.1.2** Зовнішній та внутрішній діаметри елементів слід контролювати в двох взаємоперпендикулярних перерізах за допомогою штангенциркуля з ціною поділки 0,01мм за ГОСТ 166.

В окремих випадках (коли неможливе або недоцільне застосування більш продуктивних методів, наприклад ультразвукової товщинометрії) засобами інструментального контролю перевіряють глибину поверхневих пошкоджень, які розповсюджуються вглиб тіла елемента приблизно вертикально, та глибину зашліфовування в процесі усунення поверхневих дефектів.

За допомогою штангенциркуля визначають також величину зносу (як різницю між номінальним та вимірним значенням контрольованої величини).

**10.5.1.3** Вимірювання глибини поверхневих пошкоджень та дефектів слід здійснювати за допомогою індикаторного глибиноміра з ціною поділки 0,01 мм за ГОСТ 7661. Індикатор слід виставити на нуль на горизонтальній поверхні

або безпосередньо поблизу пошкодження, глибина якого вимірюється. Відлік глибини слід здійснювати від неушкодженої зовнішньої поверхні об'єкта.

Вимірювання глибини зашлифовування в місці усунення дефекту здійснюють аналогічно. При цьому вимірювання слід здійснювати в декількох точках, де знято шар металу. Відлік глибини ведуть від поверхні, яка не піддається механічній обробці в процесі усунення дефекту.

**10.5.1.5** Результати інструментального контролю слід зафіксувати у акті.

## **10.5.2 Акустична товщинометрія**

**10.5.2.1** Акустична товщинометрія тіла елементів металоконструкцій здійснюється з метою визначення залишкової товщини стінки та/або залишкової площі поперечного перерізу трубного елемента на кородованих ділянках, в місцях дефектів з пологим дном, після усунення пошкоджень тощо.

**10.5.2.2** Акустична товщинометрія здійснюється контактним способом (акустичний контакт забезпечується щільним притисканням п'єзоперетворювача через шар контактного середовища до зовнішньої поверхні контрольованого виробу) за допомогою прямого роздільно-суміщеного п'єзоперетворювача та серійного ультразвукового товщиноміра, наприклад, ТУЗ-1, УТ-93П. Контроль ведеться переважно на частоті 2,5 та 5,0 МГц.

**10.5.2.3** Методика проведення товщинометрії елементів сталевих конструкцій передбачає попереднє настроювання (перевірку точності показів) апаратури. Серійні прилади для локальної товщинометрії, як правило, настроюються на вмонтованих в них еталонах товщини або юстирувальних плитках.

**10.5.2.4** Методика проведення локальних вимірів товщини серійними ультразвуковими товщиномірами наводиться в їх експлуатаційній документації.

**10.5.2.5** Результати товщинометрії вважаються позитивними, якщо вимірне значення товщини стінки елементів відповідає номінальним значенням товщини елемента металоконструкції.

**10.5.2.9** Результати товщинометрії слід зафіксувати в акті.

## **11 ОРГАНІЗАЦІЯ РОБІТ ТА ПІДГОТОВКА ДО ПРОВЕДЕННЯ КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ**

**11.1** Для проведення контролю механічних характеристик сталевих конструкцій їх власник (представник організації, яка експлуатує металоконструкції) повинен:

- видати наказ про організацію обстеження сталевих конструкцій з призначенням відповідальної особи;
- підготувати сталеві конструкції до проведення контролю;
- надати представникам організації, яка проводить контроль, технічну документацію, необхідну для визначення механічних характеристик сталевих конструкцій (відповідно до вимог, вказаних у розділі 8);

- за чергової оцінки механічних характеристик сталей – надати результати попереднього технічного діагностування.

**11.2** Організація, яка проводить контроль механічних характеристик сталевих конструкцій довготривалої експлуатації, повинна виконувати всі роботи в узгоджені з власником обладнання терміни та способи.

**11.3** Перед початком контролю керівник робіт повинен пересвідчитись в наявності всіх необхідних для його проведення матеріалів, приладів, зразків та інструментів та підготувати апаратуру у відповідності з її експлуатаційною документацією.

**11.4** Ділянки елементів сталевих конструкцій, які підлягають контролю, необхідно очистити від бруду, фарби, рихлих продуктів корозії, залишків мастила, а потім промити розчинником (уайт-спіритом, гасом, тощо).

**11.5** Для створення надійного акустичного контакту під час контролю сталевих конструкцій, як правило, застосовується солідол та інші консистентні мастила.

**11.6** Результати контролю повинні бути відображені в протоколах.

**11.7** Одержані результати є вихідними даними для визначення механічних характеристик сталевих конструкцій довготривалої експлуатації та підставою для прийняття рішення відповідними службами про необхідність проведення ремонту або виведення їх з подальшої експлуатації.

## **12 МЕТОДИКА КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ**

**12.1** За умови відповідності геометричних параметрів об'єктів нормативним значенням та відсутності дефектів типу порушення суцільності для визначення механічних характеристик конструкційних сталей необхідно застосовувати наступні методи контролю:

- вимірювання твердості;
- електричний контроль (чотиризондовий метод);
- магнітний контроль по коерцитивній силі (якщо це необхідно).

Виміряні значення твердості використовуються для визначення границі плинності або границі міцності (за стандартними таблицями або за кореляційними залежностями) згідно з ГОСТ 22761.

**12.2** У випадку відсутності попередньої інформації про об'єкт контролю чи неможливості визначення механічних характеристик неруйнівними методами, рекомендованим є використання руйнівних методів з наступною вирізкою зразків з відповідного елемента металоконструкції (якщо це можливо) і проведення їх випробування відповідно до ГОСТ 1497.

### **12.1 Вимірювання твердості поверхневого шару металу елементів сталевих конструкцій**

**12.1.1** Вимірювання твердості елементів конструкцій рекомендується проводити з використанням динамічних твердомірів типу ТД-32 або аналогічних йому. Принцип дії твердомірів такого типу базується на існуючій

залежності між твердістю поверхневого шару виробу та відношенням швидкостей ударного елемента під час його падіння та відбиття від поверхні виробу.

Твердість визначається за шкалами Роквелла (HRC), Брінеля (HB), Віккерса (HV). Результати вимірювання зберігаються в енергонезалежній пам'яті приладу.

**12.1.2** Методика передбачає проведення контролю сталевих конструкцій як в розібраному, так і в зібраному стані (безпосередньо в умовах експлуатації).

Обсяги та зони контролю жорстко не регламентовані і визначаються в залежності від ступеню навантаженості або пошкодженості елементів, а також, якщо є підозра на неоднорідність механічних характеристик однотипних елементів металоконструкцій. Для визначення твердості металоконструкцій в розібраному стані рекомендується проводити контроль в трьох-чотирьох діаметрально протилежних точках по всій довжині елемента, а в зібраному стані - принаймні в двох місцях кожного елемента.

Шкалу вимірювання (HRC, HB, HV) вибирають відповідно до одиниць твердості, наведених в технічній документації контрольованої сталеві конструкції.

**12.1.3** Методика проведення вимірів твердості серійними динамічними твердомірами наводиться в їх експлуатаційній документації.

**12.1.4** За виміряними значеннями твердості визначають границю міцності  $\sigma_s$  за ГОСТ 22761, або за формулою:

$$\sigma_s = k HB, \quad (1)$$

де HB - твердість за шкалою Брінеля, МПа;

$k = 0,33 - 0,36$  - коефіцієнт для сталей;

- для твердості  $HB > 1500$  МПа,

$$\sigma_s = 0,345 HB;$$

- для твердості  $HB < 1500$  МПа,

$$\sigma_s = 0,36 HB$$

**12.1.5** Метод перерахунку значень HB можна використовувати для орієнтованого визначення умовної границі плинності. На основі статичної обробки експериментальних даних:

- для твердості  $HB > 1500$  МПа  $\sigma_{0,2} = 0,367 HB$ ;

- для твердості  $HB < 1500$  МПа  $\sigma_{0,2} = 0,2 HB$

де  $\sigma_{0,2}$  – умовна границя плинності.

## **12.2 Визначення питомого електричного опору сталей електроконтактним чотиризондовим методом**

**12.2.1** Визначення питомого електричного опору сталей рекомендується проводити з використанням установки (рис.1), яка складається з атестованого мікроомметра та контактної чотиризондової вимірювальної перетворювача (рис.2).

**12.2.2** Мікрометр дозволяє вимірювати активний електричний опір на чотирьох діапазонах в одноразовому і багатократному режимах, проводити автокалібрування по зовнішнім еталонам. Принцип його роботи базується на визначенні значення падіння напруги від протікання через об'єкт постійного струму.

**12.2.3** Зонди та упори вимірювального перетворювача виконані з можливістю осьового переміщення відносно корпусу, що дозволяє проводити вимірювання питомого електричного опору як на плоских (рис.2,б), так і на циліндричних поверхнях, наприклад, трубах (рис.2,в).

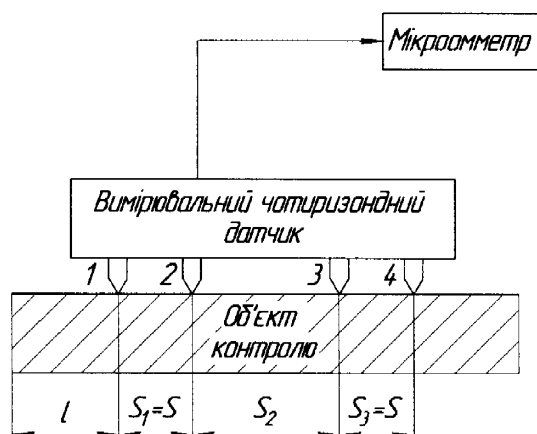
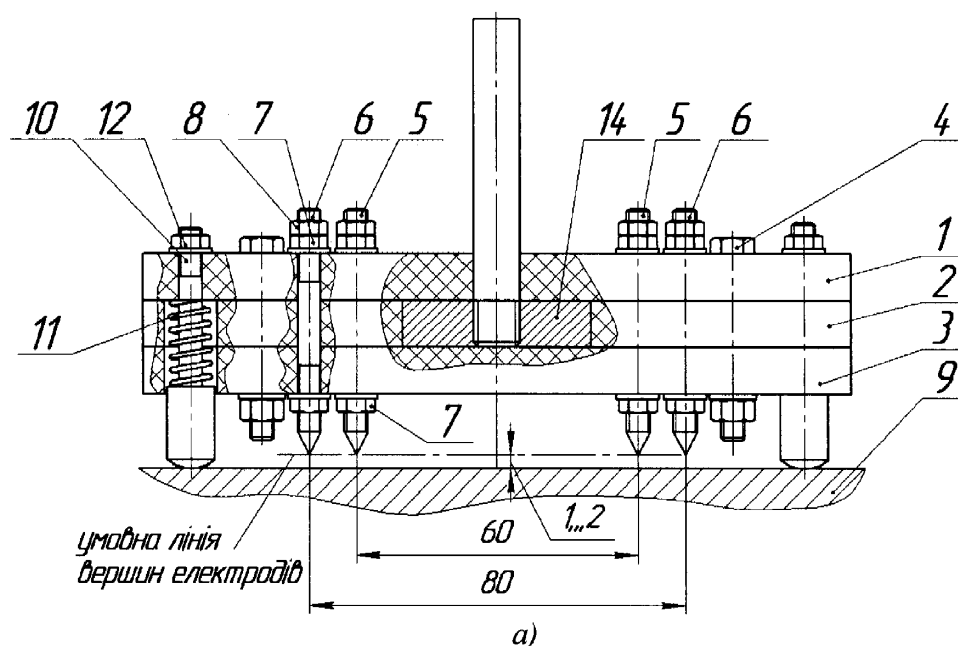
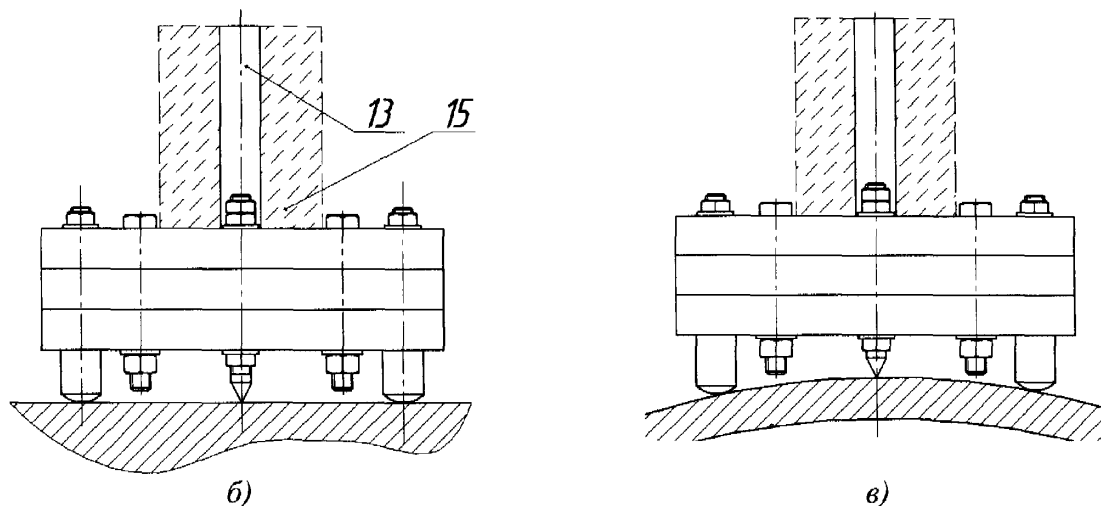


Рис.1 – Структурна схема установки для визначення питомого електричного опору сталей





1, 2, 3 – три корпусні плити; 4 – болтове з'єднання; 5 – потенціальні (вимірювальні) зонди-електроди; 6 – струмові зонди-електроди; 7, 8 – фіксуючі гайки та контргайки відповідно; 9 – об'єкт контролю; 10 – упори; 11 – стисні пружини; 12 – упорні гайки; 13 – стрижень; 14 – опорний диск; 15 – навантажувальна гантель  
 а – загальний вигляд з місцевими розмірами; б – профільний вигляд на плоскій горизонтальній площині; в – профільний вигляд на зовнішній циліндричній поверхні

**Рис.2** - Загальний вигляд чотиризондового вимірювального перетворювача

**12.2.4** Механічно зачистити поверхню об'єкта контролю до металічного блиску в місцях прилягання зондів.

**12.2.5** Чотиризондовий вимірювальний перетворювач без вантажу 15 встановити на попередньо підготовлену поверхню об'єкта контролю 9 та чітко позиціонувати його положення відносно неї.

**12.2.6** Гайками 12, нагвинченими на упори 10 відрегулювати положення корпусу вимірювального перетворювача разом із зондами 5, 6 так, щоб забезпечити попередній зазор 1...2 мм між зондами 5, 6 і досліджуваною поверхнею 9. У разі необхідності осьове положення зондів 5, 6 регулювати гайками 7 та зафіксувати контргайками 8.

**12.2.7** Необхідно зберегти паралельність умовної лінії, що проходить через кінці зондів, та поверхнею об'єкта контролю (рис.2,а). У випадку вимірювання питомого електричного опору на поверхнях циліндричної форми забезпечити паралельність умовної лінії та твірної циліндричної поверхні (рис.2,в).

**12.2.8** У випадку вимірювання на плоскому об'єкті контролю прямокутної форми, необхідно вимірювальний перетворювач встановити таким чином, щоб умовна лінія зондів співпадала з центральною лінією зразка, паралельній довшій стороні прямокутника.

**12.2.9** У випадку вимірювання на трубах великого діаметра, необхідно вимірювальний перетворювач встановити таким чином, щоб умовна лінія зондів співпадала з твірною труби (рис.2,в). При цьому вимірювальний перетворювач розмістити на відстані не менше 500 мм від торця труби чи зварного шва.

**12.2.10** Насадити навантажувальну гантель 15 на стрижень 13, який вгвинчений у опорний диск 14. В результаті цього, пружини 11 стискаються,



забезпечуючи самовстановлення корпусу на поверхні 9. Таким чином електроди 5, 6 частково проникають у вимірювальну деталь, що робить пристрій готовим для вимірювання.

**12.2.11** Вимірювання активного електричного опору рекомендується проводити з використанням атестованого мікроомметра типу БСЗ-010-2, або аналогічного йому, при цьому основна відносна похибка вимірювання в мікроомному діапазоні не повинна перевищувати  $\pm 0.1\%$ . Порядок вимірювання активного електричного опору описано у відповідній експлуатаційній документації на прилад.

**12.2.12** Розрахунок питомого електричного опору за результатами вимірювань активного електричного опору здійснюється за формулою:

$$\rho = 2\pi S \cdot R \cdot f, \quad [\mu\text{Ом} \cdot \text{м}] \quad (2)$$

де  $S = 10\text{мм}$  – відстань між струмовим та відповідним потенціальним зондом;  $R$  – виміряне значення активного електричного опору,  $\text{мкОм}$ ;  $f$  – геометрична функція поправки,  $\text{ум.од}$ .

У випадку визначення питомого електричного опору сталюого об'єкта контролю прямокутної форми (відповідно до п.12.2.8):

$$f = \left( \frac{-2m}{m+1} + \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{g=0}^{\infty} (-1)^k \cdot \left\{ 2[n^2(b/S)^2 + (k(a/S) \pm 1)^2 + 4g^2(h/S)^2]^{-1/2} - \left[ -2[n^2(b/S)^2 + (k(a/S) \pm [m+1])^2 + 4g^2(h/S)^2]^{-1/2} \right] \right\} \right)^{-1} \quad (3)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $h$  – відповідно довжина, ширина, товщина зразка,  $\text{мм}$ ;  $m = S_2/S = 6$  – співвідношення відстаней між зондами.

У випадку визначення питомого електричного опору сталюих труб великого діаметра (відповідно до п.12.2.9):

$$f = \left\{ \frac{2m}{m+1} + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left( [1 + 4n^2(h/S)^2]^{-1/2} - [(m+1)^2 + 4n^2(h/S)^2]^{-1/2} \right) \right\}^{-1}. \quad (4)$$

**12.2.13** Контроль питомого електричного опору слід проводити при температурі  $20^\circ\text{C}$ . При здійсненні вимірювань за інших значень температури навколишнього середовища, необхідно враховувати температурний коефіцієнт опору (ТКО) для відповідних сталей. Для низьковуглецевих сталей  $\text{ТКО} = 0.0083 \text{ К}^{-1}$ .

Питомий електричний опір, приведений до температури  $20^\circ\text{C}$ , визначається:

$$\rho_0 = \frac{\rho_T}{1 + \text{ТКО}(T - T_0)}, \quad (5)$$

де  $\rho_0$  – питомий електричний опір при температурі  $20^\circ\text{C}$ ;  $\rho_T$  – питомий електричний опір при досліджуваній температурі;  $(T - T_0)$  – різниця температур.

**12.3** Здійснити 5-кратні вимірювання твердості та питомого електричного опору.

**12.4** Виміряне значення питомого електричного опору в комплексі зі твердістю бере участь у розрахунку інформаційно-вимірювальною системою механічних характеристик сталей (наприклад, границі плинності). Кореляційний зв'язок між інформативними параметрами та ФМХ визначається

на кожному підприємстві на основі інформаційного масиву для кожної марки або групи сталей.

### 13 ОБРОБЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

**13.1** Обов'язковому визначенню підлягають статистичні характеристики по кожному інформаційному масиву, склад яких наведений в ГОСТ 30415.

**13.2** Оцінка досліджуваних параметрів вважається задовільною, якщо зміна центру розподілу відносно центральної лінії не перевищує  $\pm 0.5 S_{\text{зали}}$  ( $S_{\text{зали}}$  - залишкове середнє квадратичне відхилення і-го параметра).

Залишкове середнє квадратичне відхилення і-го параметра визначається за формулами:

$$S_{\text{зали}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(X_i' - X_i)^2}{(N-1)}} \quad (6)$$

$$\text{або } S_{\text{зали}} = S_i \sqrt{1 - R^2}, \quad (7)$$

де  $X_i$ ,  $X_i'$  - показники якості (механічні характеристики), які визначаються при неруйнівних і руйнівних випробуваннях;

$N$  - об'єм вибірки;

$S_i$  - середнє квадратичне відхилення і-го параметра;

$R$  - коефіцієнт кореляції.

При більшому зміщенні центру розподілу відхилень здійснюється корекція рівнянь регресії; заключення про необхідність вказаної корекції надається на основі обробки вибірки об'ємом не менше 30 зразків.

**13.3** В протокол випробувань заносять номер нормативного документа, по якому поставляється продукція, марку сталі, товщину, типорозмір контрольованого виробу, номер партії, значення інформативних параметрів і механічні характеристики (додаток Б).

**13.4** В протоколі випробувань металоконструкції, яка проконтрольована згідно даного стандарту, вказують механічні характеристики в одиницях, встановлених в стандартах на продукцію.

## **ДОДАТОК А**

### **(довідковий)**

#### **Апаратура, рекомендована для використання під час проведення неруйнівного контролю механічних характеристик сталей**

**А.1** Ультразвукові дефектоскопи УД2-12 (НВО “Интроскоп”, м.Кишинів, Молдова), УД2-70 (“Експерт-1”) (НВФ “Ультракон-Сервіс”, м. Київ, Україна), ДІО-562.

**А.2** Ультразвукові товщиноміри для локальних замірів товщини стінки ТУЗ-1 (серійно випускаються НВФ “Ультракон-Сервіс”, м.Київ), УТ-93П (серійно випускається НВО “Интроскоп”, м.Кишинів, Молдова) та аналогічні їм

**А.3** Твердоміри динамічні типу ТД-32 (серійно випускаються НВФ “Ультракон-Сервіс”, м.Київ).

**А.4** Мікроомметр БСЗ-010-2 (фірма “Самараенерго”, Росія).

**А.5** Структуроскоп магнітний мікропроцесорний типу КРМ-Ц-КЗ (серійно випускаються науково-виробничою фірмою “СНР”, м. Харків).

**А.6** Штангенциркуль ЩЦ II-250.0.05 ГОСТ 166.

**А.7** Глибиномір індикаторний ГИ/100 ГОСТ 7661.

**А.8** Лупа збільшувальна ГОСТ 25706.

**А.9** Рулетка Р10УЗП ГОСТ 7502.

**Примітка.** Зазначені методики можуть бути реалізовані за допомогою інших приладів та установок з характеристиками, не гіршими, ніж у наведеного в переліку обладнання.





## ДОДАТОК В

### Бібліографія

ГОСТ 27.202-83 Надежность в технике, технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции.

ГОСТ 15895-77 Статистические методы управления качеством продукции.

Термины и определения

ГОСТ 20736-75 Статистический приемочный контроль по количественному признаку. Термины и определения

ДНАОП 0.00-1.27-97. Правила атестації фахівців з неруйнівного контролю.

ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

НАОП 2.1.21-1.01-74. Правила безопасности в нефтегазодобывающей промышленности.

## Додаток К

**Акт промислової апробації дослідно-експериментальної установки  
в умовах ТзОВ "Івано-Франківський "Вторчормет"**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер  
ТзОВ "Івано-Франківський  
"Вторчормет"

Мельник С.О.   
"27" травня 2010р.

## АКТ

промислової апробації експериментальної установки для визначення  
механічних характеристик сталей в умовах промислу ТзОВ "Івано-  
Франківський "Вторчормет"

Робоча група в складі:

голови Рибіцького І.В. – к.т.н, старшого наукового співробітника НДІ  
НГЕІЕ

і членів робочої групи:

1 Доценка Є.Р. – наукового співробітника НДІ НГЕІЕ

2 Точилова Н.А. – наукового співробітника НДІ НГЕІЕ

3 \_\_\_\_\_

Склала цей акт про таке:

1 25.05.2010р. робоча група здійснила промислову апробацію експериментальної установки для визначення механічних характеристик сталей із запропонованою методикою.

2 Робочій групі були надані:

- методика експериментальних досліджень;
- результати попередніх лабораторних випробувань;
- експериментальна установка для визначення механічних характеристик сталей.

3 Робоча група розглянула надані матеріали і встановила, що експериментальна установка для визначення механічних характеристик сталей вимогам, вказаним у методиці експериментальних досліджень.

4 Робоча група провела промислову апробацію експериментальної установки на трьох різних взірцях конструкційної сталі, які володіють різними механічними характеристиками. Форма взірців – прямокутна. Геометричні розміри взірців: довжина 300 мм, ширина 200 мм, товщина 10 мм. На кожному взірці проводилося вимірювання питомого електричного опору та твердості. Випробування проводилось з метою визначення значень границі плинності сталевих зразків.

З кожного взірця було виготовлено стандартні пропорційні зразки згідно ГОСТ 10006-80, які були піддані руйнівним випробуванням з

метою визначення дійсних значень границі плинності. Руйнівні випробування проводилися в умовах Науково-виробничої фірми "Зонд" на випробувальній машині УММ-20 (зав.№742, свід. про повірку №1198 від 21.05.2010).

Покази експериментальної установки (середні значення за трьома вимірюваннями) та відповідні дійсні значення границі плинності відповідних сталей, визначені згідно ГОСТ 10006-80, наведені в табл.1.

**Таблиця 1 – Результати визначення границі плинності конструкційних сталей**

№ взірця	Значення границі плинності, визначені за ГОСТ 10006-80, МПа	Покази експериментальної установки, МПа
1	267	277
2	320	329
3	442	431

Результати апробації дозволяють стверджувати про повторюваність показів експериментальної установки. Значення границі плинності, визначені за допомогою експериментальної установки, знаходяться в межах дійсних значень, визначених руйнівними випробуваннями.

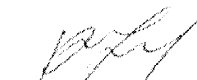
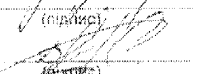
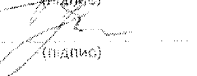

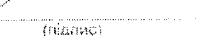
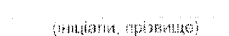
**5** Робочою групою відзначені такі недоліки:

- 1) необхідність механічного зачищення поверхні взірців;
- 2) тривалий час встановлення датчика контролю питомого електричного опору строго по центрі взірця.

**6** Робоча група пропонує:

- а) усунути виявлені в процесі апробації недоліки;
- б) покращити роботу контактного механізму блоку вимірювання питомого електричного опору.

Члени робочої групи

 (підпис)	Рибіцький І.В. (ініціали, прізвище)
 (підпис)	Доценко Є.Р. (ініціали, прізвище)
 (підпис)	 (ініціали, прізвище)
 (підпис)	 (ініціали, прізвище)

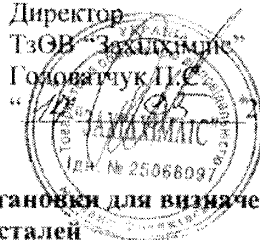


## Додаток Л

**Акт промислової апробації дослідно-експериментальної установки  
в умовах ТзОВ “Західхімліс”**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор  
ТзОВ “Західхімліс”  
Головатчук П.Є.  
“ 12.05.2010р.



**АКТ**

**промислової апробації експериментальної установки для визначення  
механічних характеристик сталей**

**Робоча група в складі:**

голови Яворського А.В. – канд. техн. наук, провідного наукового співробітника НДІ НГЕІЕ ІФНТУНГ

**і членів робочої групи:**

1 Балана І.С. – головного інженера ТзОВ “Західхімліс”

2 Мегидника Р.М. – начальника збірно-механічної дільниці ТзОВ “Західхімліс”

3 Доценка Є.Р. – наукового співробітника НДІ НГЕІЕ ІФНТУНГ

4 Рибіцького І.В. – старшого наукового співробітника НДІ НГЕІЕ ІФНТУНГ

склала цей акт про таке:

1 12.05.2010р. робоча група здійснила апробацію дослідно-експериментальної установки для визначення механічних характеристик сталей за їх питомим електричним опором згідно із запропонованою методикою.

2 Робочій групі були надані:

- результати попередніх лабораторних випробувань;
- методика експериментальних досліджень;
- експериментальна установка для визначення механічних характеристик сталей.

3 Робоча група розглянула методику експериментальних досліджень та результати попередніх лабораторних випробувань експериментальної установки та погодилася проводити промислову апробацію.

4 Робоча група провела апробацію експериментальної установки на трьох різних зразках із листової конструкційної сталі прямокутної форми, які були вирізані з габаритних сталевих листів. Марки сталей – 325-09Г2С-12, сталь 45, 09Г2С. Геометричні розміри зразків наведено в табл.1. Випробування проводилось з метою визначення дійсного значення границі плинності сталі.

Відповідно до методики експериментальних досліджень на кожному зразку проводилися по три вимірювання електричного опору та твердості. Усереднені значення твердості, електричного опору та розрахованого питомого електричного опору наведено в табл.1.

Значення границі плинності, визначеної з допомогою експериментальної установки за значеннями питомого електричного опору і твердості, та відповідні значення границі плинності, вказаних у сертифікатах на вказані марки сталі (копії сертифікатів додаються), наведені в табл. 2.

Таблиця 1 – Результати вимірювання твердості та питомого електричного опору

Марка сталі	Геометричні розміри зразків			Геометрична функція поправки	Електричний опір, мкОм	Питомий електричний опір, нОм·м	Твердість
	Довжина, мм	Шарик, мм	Товщина, мм				
<i>09Г2С</i>	400	300	10	0,2432	21,73	332	174
<i>325-09Г2С-12</i>	400	300	12	0,2843	19,59	350	207
<i>Сталь 45</i>	400	300	30	0,4877	8,97	275	163

Таблиця 2 – Результати визначення границі плинності сталей

Марка сталі	Значення границі плинності, вказаних в сертифікаті, МПа	Покази експериментальної установки, МПа
<i>09Г2С</i>	<i>399</i>	<i>409</i>
<i>325-09Г2С-12</i>	<i>420</i>	<i>411</i>
<i>Сталь 45</i>	<i>345</i>	<i>357</i>

Оскільки діапазон значень границі плинності, на роботу в якому була налаштована попередньо установка, становить 230-500 МПа, то найбільша відносна похибка зведена до діапазону складає 4.4 %. Таким чином, значення границі плинності, визначені за допомогою експериментальної установки, знаходяться в межах дійсних значень згідно із заявленими у відповідних сертифікатах на сталі.

5 Робочою групою відзначені такі недоліки:






- 1) необхідність проведення попереднього зачищення поверхні зразків;
- 2) тривалий час позиціонування вимірювального перетворювача контролю питомого електричного опору відносно центра зразка;
- 3) відсутність автоматизації розрахунку значень границі плинності сталей.

6 Робоча група пропонує:

- а) усунути виявлені в процесі випробувань недоліки;
- б) оптимізувати систему забезпечення електричного контакту з об'єктом контролю.

7 Робоча група встановила, що експериментальна установка для визначення механічних характеристик сталей успішно пройшла промислову апробацію та з урахуванням вказаних недоліків може бути використана для контролю границі плинності у виробничих умовах.

Члени робочої  
групи

  
\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)  
  
\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)  
  
\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)  
  
\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)  
  
\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

Яворський А.В.

(ініціали, прізвище)

Балан І.С.

(ініціали, прізвище)

Мегидиник Р.М.

(ініціали, прізвище)

Доценко С.Р.

(ініціали, прізвище)

Рибіцький І.В.

(ініціали, прізвище)

УКРАИНА  
UKRAINE



О А О АЛЧЕВСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ"  
JOINT STOCK COMPANY "ALCHEVSK IRON & STEEL WORKS"

94202 г. Алчевск, ул. Шмидта, 4  
тел. (06442) 7-34-25, 7-33-20, 7-33-82  
факс (06442) 7-33-76

94202, Ukraine, Alchevsk, Schmidt str. 4.  
Tel: (06442) 7-34-25, 7-33-20, 7-33-82  
Fax (06442) 7-33-76

ЗАВОДСКОЙ СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА №  
MILL'S QUALITY CERTIFICATE №

24218

Дата 31.07.09  
Date

Лист 1 из листов 1  
Sheet 1 of sheets 1

Свидетельство о приемочных испытаниях  
Inspection certificate

EN 10204/3.1

Контракт № Contract №	2000-2077/1 инст- 026/0109-0у- 997	Заводской заказ № Manufacturer's production order №	1060
--------------------------	--	--	------

Customer:

Количество листов: 45

Вагон №  
RW-car № 65724007

наименование товара "TM" Description of goods		горячекатаный стальной лист с обрезными кромками hot rolled steel plates with sheared edges			Стандарт: Standard: ГОСТ 19281-89 кат. 12 кл. пр. 345 ГОСТ 19903-74 Б.ПН,О,Ф.4				
Марка стали Grade of steel		09Г2С							
Состояние поставки Delivery condition:		горячекатаный hot-rolled							
№ позиц Item	вес листа weight of the plate	Номера плавов Cast №	Номера партий Test №	Размеры, мм Dimensions, mm			Количество листов шт/мест Quantity/pcs	Количество пачек Pack	Теоретический вес, тн Theoretical weight, m.t
				Толщина Thickness	Ширина Width	Длина Length			
1	0,948	09K11565	1683	10	2000	6000	45		42,660
Total:							45		42,660

*данные введены на основании сертификата  
испытания № 1060*

09K11565 - 2

Выплавка : конверторный способ производства.  
Steelmaking process : basic oxygen steel making

Заводской сертификат качества №  
Mill's quality certificate №

24218

Номер плавки Cast №	Химический состав, % Chemical composition, %										C+	Mn/6					
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	N			V	Mo	Ti	As	Nb
	X 100		X 1000			X 100			X 1000								
09K11565	11	154	63	13	17	6.2	3.2	4.7	27	4.5			6.6	5			

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ TEST RESULTS

№ партии test №	Испытание на растяжение и ударный изгиб Tensile and impact test										Изгиб Bend					
	Размеры образца D.m. of specimen		Отбор образца Specimen			Температура испытаний Test temperature Co	Предел текучести Yield point, Reh N/mm2	Предел прочности Tensile strength Rm, N/mm2	Относ. удлинение Elongation Lo=5.65vF 0 %	Сужение Reduction of area Z %		1=(J) 2=(J/sm <sup>2</sup> ) 3=(%) 4=(J/sm <sup>2</sup> )	Энергия удара KU Energy Absorption Ударная вязкость KCU Impact strength Волокнистая составляющая Shear Fracture Ударная вязкость после механического старения			
	толщина thick-ness, mm	ширина width, mm	Место Location	Направление Direction	Положение Position											
						Значения Values										
	1	2	3	Σn												
1683-1	10	30		T		+20	399	529	28.0							sat
1683-2	10	10		T		-40				2	181	154		168		sat
	7.5	10		T		+20				4	167	170		169		
	10	30		T		+20	401	539	30.0							sat
	10	10		T		-40				2	206	179		193		
	7.5	10		T		+20				4	176	173		175		

Маркировка: марка стали, размеры, № плавки, № партии.  
Marking: grade of steel, dimensions, cast №, test №.  
Клеймовка: № плавки, № партии, марка стали, тов. знак комбината, К клейм.  
Hard stamp: cast №, test №, grade of steel, mark of the works, K stamp

*Для проведения маркетных исследований  
исполн. И.И.И.*

*Эксперт*  
Эксперт's stamp

*Закінчено*УКРАИНА  
UKRAINEО А О АЛЧЕВСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ  
JOINT STOCK COMPANY "ALCHEVSK IRON & STEEL WORKS"94202 г. Алчевск, ул. Шмидта, 4  
тел. (06442) 7-34-25 7-33-20 7-33-82  
факс (06442) 7-33-76Тел (06442) 7-34-25 7-33-20 7-33-82  
Факс (06442) 7-33-76ЗАВОДСКОЙ СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА №  
MILL'S QUALITY CERTIFICATE №

70761

Дата  
Date

17.05.03

Лист из листов  
Sheet 1 of 1 sheetsСвидетельство о приемочных испытаниях  
Inspection certificate

EN 10204/3.1

Контракт №  
Contract № 2000-207/1 лист-026/0109-0у-997Заводской заказ №  
Manufacturer's production order № 2258

Customer:

Вагон №  
RW-car № 67672311

Наименование товара "ТМ" Description of goods:	горячекатаный стальной лист с обрезными кромками hot rolled steel plates with sheared edges	Стандарт Standard: ГОСТ 1577-93 ГОСТ 1050-88 ГОСТ 19903-74, Б.П.О.Ф.4
Марка стали Grade of steel	45	

Состояние поставки:  
Delivery condition: нормализованный  
normalized

вес листа weight of the plate	Номера плавов Cast №	Номера партий Test №	Размеры, мм Dimensions, mm			Количество листа шт/мост Quantity/pcs	Теоретический вес, тн Theoretical weight, tn
			Толщина Thickness	Ширина Width	Длина Length		
2,572	08500362	57877	30	1500	7200	3	7,716
2,572	08500362	57797	30	1500	7200	15	38,580
2,572	08600335	57296	30	1500	7200	4	10,288
2,855	08600335	57228	40	1500	6000	1	2,855
2,855	08500362	57676	40	1500	6000	1	2,855
Total quantity (pcs): 24						Total theoretical	

*для проведения надувки с сертификатами  
поиск брака.*

Выплавка: мартеновский способ производства  
 Steelmaking process: open hearth furnaces.

Заводской сертификат качества №  
 Mill's quality certificate №

70761

Номер плавки Cast №	Химический состав, % Chemical composition, %										V	Mo	Ti	As	Nb	CE	
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	N							
	X 100		X 1000			X 100			X 1000								X 100
08500362	48	68	22	25	8	4	4	5	5	8							
08600335	46	69	25	24	8	5	4	7	5	8							

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ TEST RESULTS

№ партии test №	Испытание на растяжение и ударный изгиб Tensile and impact test										Изгиб Bend				
	Размеры образца Dim of specimen		Отбор образца Specimen			Температура испытаний Temperature	Предел текучести Yield point	Предел прочности Tensile strength	Относ. удлинение Elongation	Макро Macro		1=0 2=0,3m2 3=0,5 4=	Энергия удара KU Impact energy Ударная вязкость KCU Impact strength Волокнистая составляющая Fibrous appearance Твердость Hardness HB		
	толщина thick-ness, mm	ширина width, mm	Место Location	Направление Direction	Положение Position	испытаний Test	Ren N/mm <sup>2</sup>	Rm, N/mm <sup>2</sup>	Lo=A5 %						
	Ø					tem-perature C°				значения Values		2	3	Σn	
57877	Ø 10	30	50		T		+20	345			sat	4	187	179	
57787	Ø 10	30	50		T		+20	347			sat	4	173	174	
57296	Ø 10	30	50		T		+20	342			sat	4	194	197	
57228	Ø 10	40	50		T		+20	346			sat	4	187	192	
57876	Ø 10	40	50		T		+20	343			sat	4	179	183	

Маркировка: марка стали, размеры, № плавки, № партии

Marking: grade of steel, dimensions, cast №, test №

Клеймо: № плавки, марка стали, тов. знак комбината, К клеймо

Hard stamp: cast №, grade of steel, mark of the works, K stamp

Цветная маркировка:

Color marking:

*для информации, мажорке  
 для маркировки  
 Юсупов А.А.  
 От Р*

Подпись

Signature

*Юсупов А.А.*



