

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЧОТИРИКОНТАКТНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО МЕТОДУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПИТОМОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ГАБАРИТНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Є.Р.Доценко, О.М. Карнаш, М.О.Карнаш

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 504708

e-mail: dotsenko@nung.edu.ua

Наведено результати експериментальних досліджень для визначення питомого електричного опору конструкційних сталей на прикладі сталі 45 за допомогою розробленої експериментальної установки, що реалізує чотириконтактний електричний метод контролю.

Показано, що чотириконтактний метод застосовувати і для габаритних металоконструкцій, оскільки на значення вимірюваного електричного опору впливає не вся ширина об'єкта контролю, а лише так звана умовна ефективна ширина. Під умовною ефективною шириною зразка слід розуміти ту частину зразка, в якому густина постійного струму, що проходить крізь об'єкт, є найбільшою, і яка, власне, впливає на вимірювання значення електричного опору.

Ключові слова: металоконструкції, фізико-механічні характеристики, питомий електричний опір, чотириконтактний метод

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению удельного электрического сопротивления конструкционных сталей на примере стали 45 с помощью разработанной экспериментальной установки, реализующей четырехконтактный электрический метод контроля.

Показано, что четырехконтактный метод можно использовать и для габаритных металлоконструкций, так как на значение измеряемого электрического сопротивления влияет не вся ширина объекта контроля, а только так называемая условная эффективная ширина. Под условным эффективной шириной образца следует понимать ту часть образца, где плотность проходящего сквозь объект постоянного тока является наибольшей и которая собственно влияет на измеренное значение электрического сопротивления.

Ключевые слова: металлоконструкции, физико-механические свойства, удельное электрическое сопротивление, четырёх контактный метод

The results of experimental studies to determine the specific electrical resistance of structural steels by the example of steel 45 with the help of an experimental setup that implements the four electrical contact method of control.

Shown that the four contact method can be used for oversized hardware, because the value of electrical resistance, measured, does not affect the whole width of the object of control, but the so-called conventional effective width. Under the conditional effective width of the sample should be understood that part of the sample where the density of direct current passing through the object, is the largest and that actually affects the measured value of electrical resistance.

Keywords: metalworks, physical and mechanical properties, resistivity, four-point method

Проблеми визначення та продовження ресурсу безпечної експлуатації металоконструкцій за останні десятиліття набули надзвичайної актуальності у всіх промислово розвинених країнах. Для України важливість їх вирішення обумовлена зниженням об'ємів виробництва для поновлення парку металоконструкцій. Це, насамперед, стосується об'єктів теплової та ядерної енергетики, нафтогазопроводів, хімічної промисловості, промислового будівництва.

Ресурс безпечної експлуатації металоконструкцій визначається, в тому числі, станом структури та фізико-механічними характеристиками металу, які можуть змінюватися у ході багаторічної понаднормової експлуатації промислових об'єктів [1].

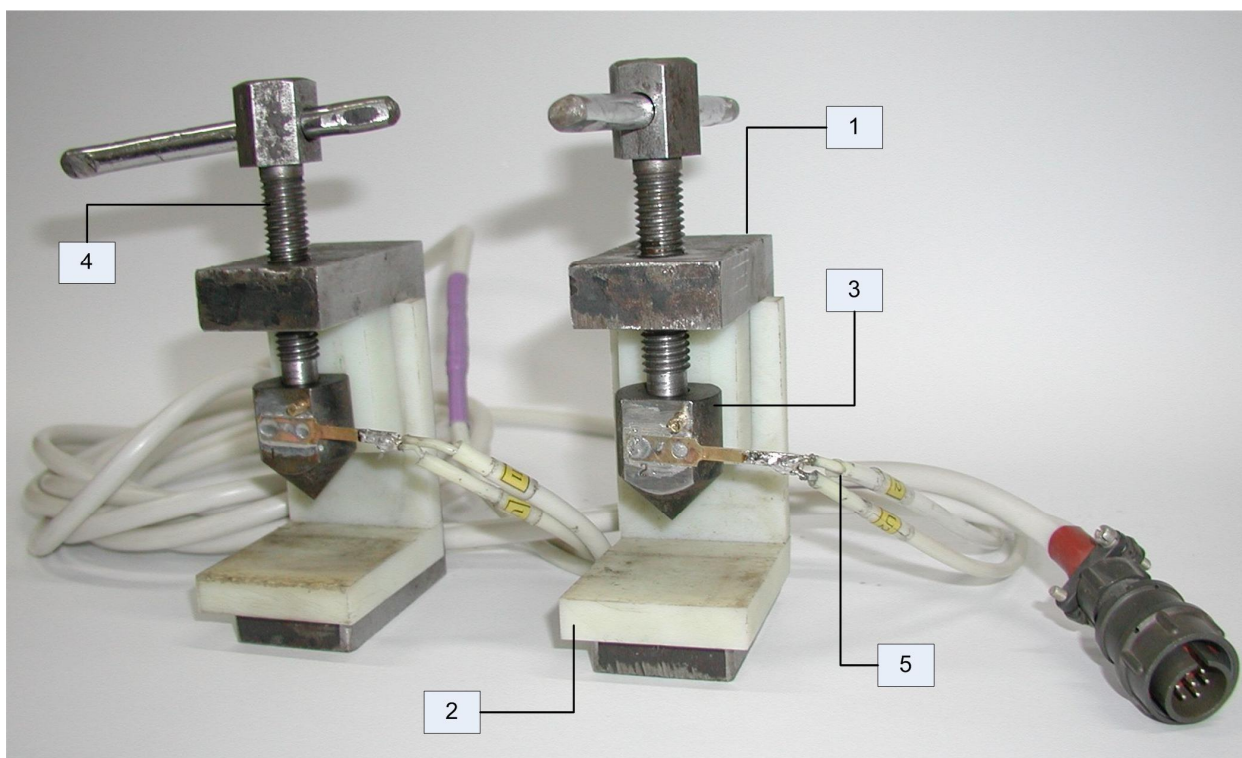
На даний час приділяється значна увага розробці методів та засобів для визначення фізико-механічних характеристик матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації неруйнівними методами [2]. На попередніх етапах досліджень авторами було розроблено новий підхід

до визначення фізико-механічних характеристик конструкційних сталей з врахуванням їх структури [3] та досліджено чутливість питомого електричного опору до мікроструктурних змін, що виникають у матеріалі металоконструкцій під час тривалої експлуатації [4]. Тобто, механічні та електрофізичні властивості (зокрема питомий електричний опір) матеріалів взаємозв'язані на рівні структури [5].

Вимірювання малих значень питомого електричного опору феромагнітних сталей у реальних умовах з необхідною точністю викликає значні труднощі [6].

В ІФНТУНГ розроблена лабораторна установка для вимірювання питомого електричного опору сталей, що реалізує чотириконтактний електричний метод. Даний метод дає змогу вимірювати низькі значення електричного опору і мінімізувати вплив перехідних опорів на результати вимірювання [7].

Однак під час застосування чотириконтактного методу необхідно враховувати ефекти



1 – струпуцина; 2 – діелектрична підставка; 3 – гартований сталевий контактний наконечник; 4 – затискний гвинт; 5 – струмовий та потенціалний провідники

**Рисунок 1 – Загальний вигляд контактних затискачів**

розтікання постійного струму в сталевому об'єкті контролю між двома струмопідвідними затискачами.

Таким чином, метою даної роботи є забезпечення стабільного електричного контакту між затискачами та об'єктом, а також встановлення залежностей показів мікроомметра від геометричних розмірів сталевих зразків.

Експериментальна установка для визначення питомого електричного опору виготовлена на базі атестованого мікроомметра БСЗ-010-2 фірми "Самараенерго" (Росія). Даний прилад призначений для вимірювання малих значень активного електричного опору. Мікроомметр дає змогу вимірювати опір в чотирьох діапазонах за однократного та багатократного режимів, проводити автокалібрування на зовнішніх еталонах.

З метою забезпечення надійного рівномірного електричного контакту контакторів з об'єктом контролю, першочерговим завданням стало виготовлення контактних затискачів, які б дали змогу втискати з однаковим зусиллям в сталеві зразки контактні наконечники. Контактні наконечники конусоподібної форми виготовлені із сталі 45 і були піддані термічній операції – загартуванню. Загальний вигляд контактних затискачів представлений на рис. 1.

Сила втискування контактних наконечників в об'єкт контролю встановлюється динамометричним ключем фірми Apelas. Контактні наконечники втискаються в сталевий зразок настільки, наскільки дозволяє сила затискача,

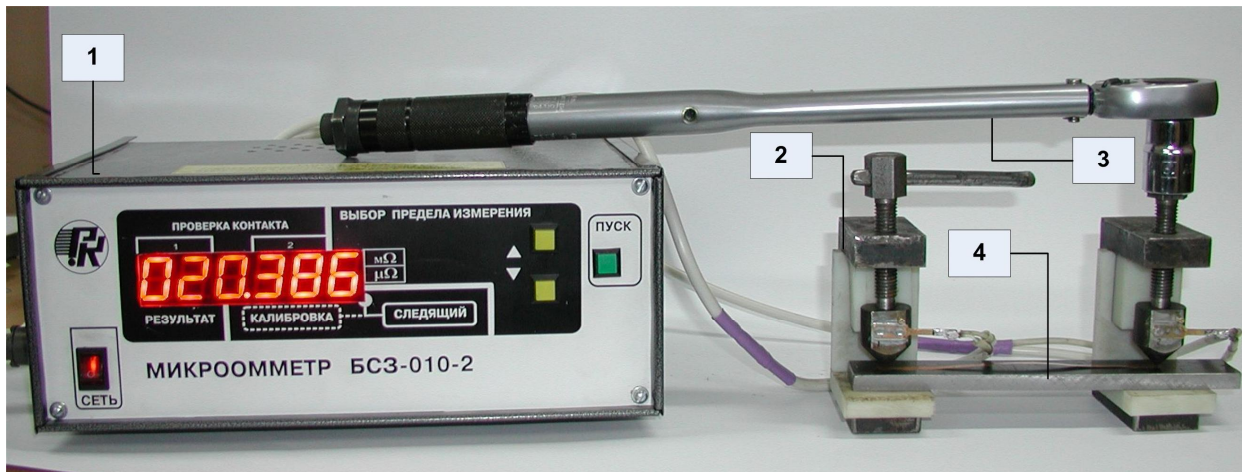
яку можна фіксувати на ручці динамометричного ключа.

Загальний вигляд експериментальної установки для вимірювання питомого електричного опору зображено на рис. 2.

Для того, щоб пересвідчитись у постійності електричного контакту між контактними затискачами та об'єктом контролю, було відібрано сталевий пруток, довжина якого ( $L=2\text{м}$ ) набагато більша за поперечні розміри (площа поперечного перерізу  $S=1.44\text{ см}^2$ ). В цьому випадку постійний струм буде проходити у всьому об'ємі прутка, забезпечуючи лінійний характер залежності електричного опору від відстані між контактами.

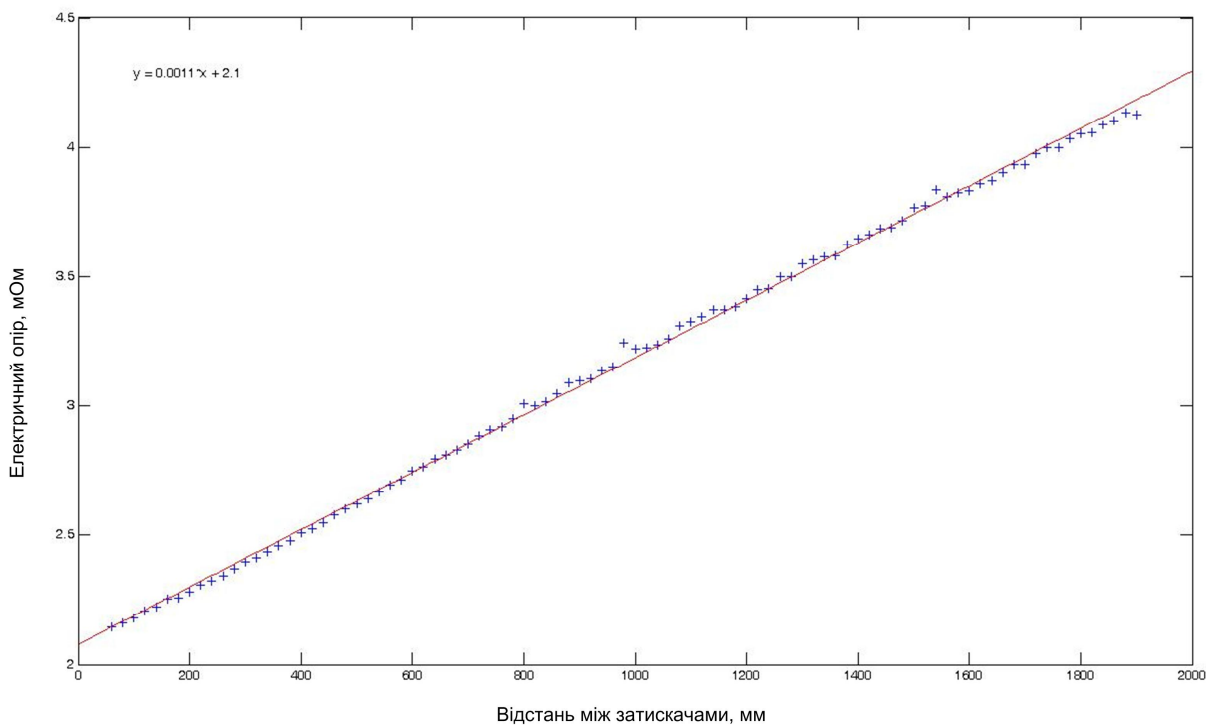
Методика вимірювання електричного опору на зразку полягала ось у чому. Для зменшення впливу крайових ефектів перший контактний затискач закріплювався на відстані 50 мм від одного краю зразка, а другий – на такій самій відстані від протилежного краю зразка. Початкова відстань між затискачами - 1900 мм. Контакти розміщуються вздовж осевої лінії, проведеної посередині зразка. Фіксується вимірне значення електричного опору на цифровому індикаторі мікроомметра, після чого другий затискач закріплюється на ближчу відстань від першого з кроком 20 мм. Мінімальна відстань між контактними затискачами становила 60 мм.

За результатами вимірювань побудовано графік залежності електричного опору від відстані між контактними затискачами для сталевих прутків, зображеного на рис.3.



1 – мікроомметр БСЗ-010-2; 2 – контактні затискачі; 3 – динамометричний ключ;  
4 – закріплений сталевий зразок

Рисунок 2 – Загальний вигляд експериментальної установки для визначення питомого електричного опору



+ - експериментальні дані; --- - лінійна апроксимація

Рисунок 3 - Графік залежності електричного опору від відстані між контактними затискачами для сталевих прутків довжиною 2 м

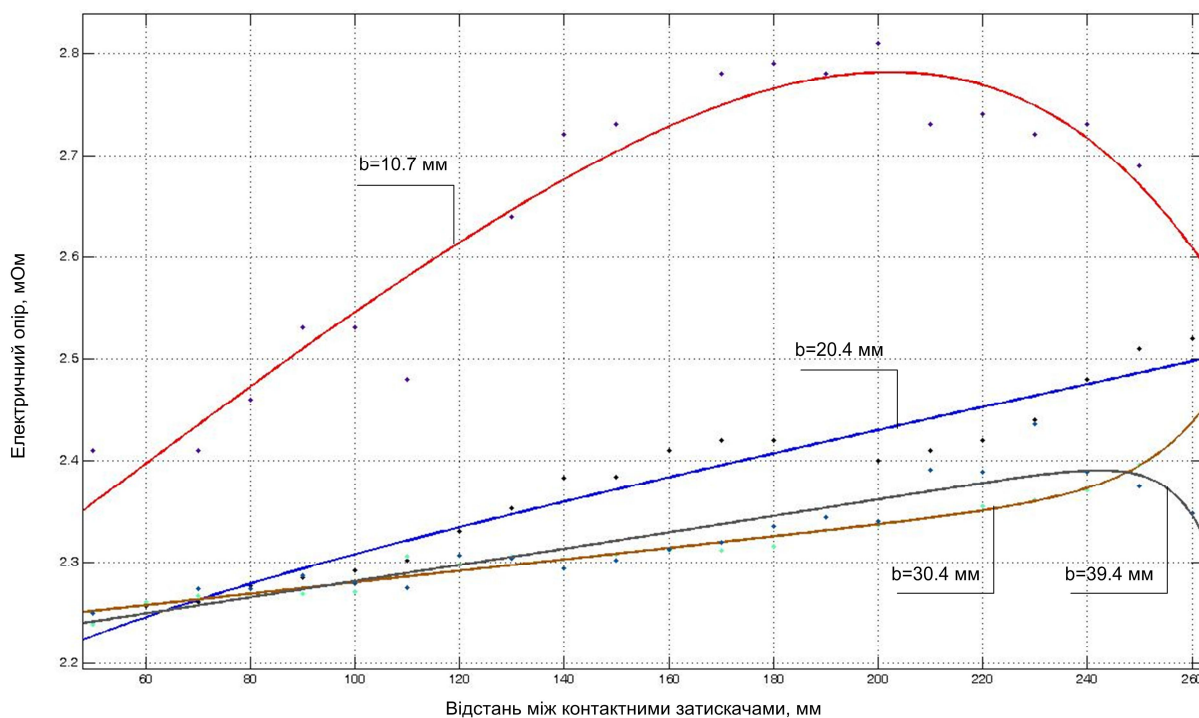
Як бачимо з рис. 3, розкид експериментальних даних від лінійної залежності є незначним, що свідчить про стабільний електричний контакт, встановлений за допомогою динамометричного ключа. Перехідний опір контактної з'єднання становить 2,0776 мОм, визначений як перетин апроксимаційної лінії з віссю ординат ( $l=0$  мм).

Метою наступного етапу експериментальних досліджень було встановлення характеру залежності результатів вимірювання електричного опору від геометричних параметрів об'єкта контролю. Для цього було підготовлено

чотири зразки зі сталі 45 однакової товщини та довжини, але різної ширини. Геометричні розміри підготовлених зразків наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Геометричні параметри сталевих експериментальних зразків

№ зразка	Довжина, мм	Ширина, мм	Товщина, мм
1	280	10.7	10
2	280	20.4	10
3	280	30.4	10
4	280	39.4	10



**Рисунок 4 – Графічні залежності електричного опору від відстані між контактними затискачами для сталевих зразків**

Методика вимірювання електричного опору на даних зразках аналогічна методиці для довгого сталевго прутка. Максимальна відстань між контактними затискачами становить 260 мм, мінімальна – 50 мм, лінійний крок вимірювання – 10 мм, контакти розміщуються вздовж осьової лінії.

За результатами вимірювання було проведено кореляційний та графічний аналіз в програмному пакеті Matlab 2006b з метою встановлення характеру залежностей між показами мікроомметра та відстані між контактними затискачами для зразків з різною шириною.

В табл. 2 наведено значення коефіцієнтів кореляції між вимірними значеннями електричного опору та відстанню між контактними затискачами.

**Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів кореляції між електричним опором та відстанню між контактами**

№ зразка	Значення коефіцієнта кореляції
1	0,837
2	0,967
3	0,973
4	0,897

Як видно з табл. 2, значення коефіцієнтів кореляції є досить високими, проте очевидно, що характер залежностей має нелінійний характер.

На рис. 4 зображено графічні залежності вимірних значень електричного опору від відстані між контактними затискачами.

Питомий електричний опір провідного об'єкта правильної форми описується формулою:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}, \quad (1)$$

де:  $R$  – електричний опір;  $l$  – довжина провідника;  $S$  – площа поперечного перерізу провідника.

Слід зазначити, що для чотириконтактного методу вираз для розрахунку питомого електричного опору вираз (1) можна застосовувати тільки в тому випадку, коли довжина об'єкта значно більша від поперечного перерізу (як у розглянутому випадку зі довгим сталевим прутком). В такому разі постійний струм розтікається по всьому об'єму взірця як в ширину, так і в глибину. В іншому випадку слід вводити поправочний коефіцієнт, який залежить від форми, розмірів об'єкта контролю та взаємного розміщення контактів вимірювальної системи.

Враховуючи сказане вище, вираз для розрахунку питомого електричного опору можна описати так [8]:

$$\rho = R_S \cdot h, \quad (2)$$

де:  $R_S$  – поверхневий опір;  $h$  – товщина зразка.

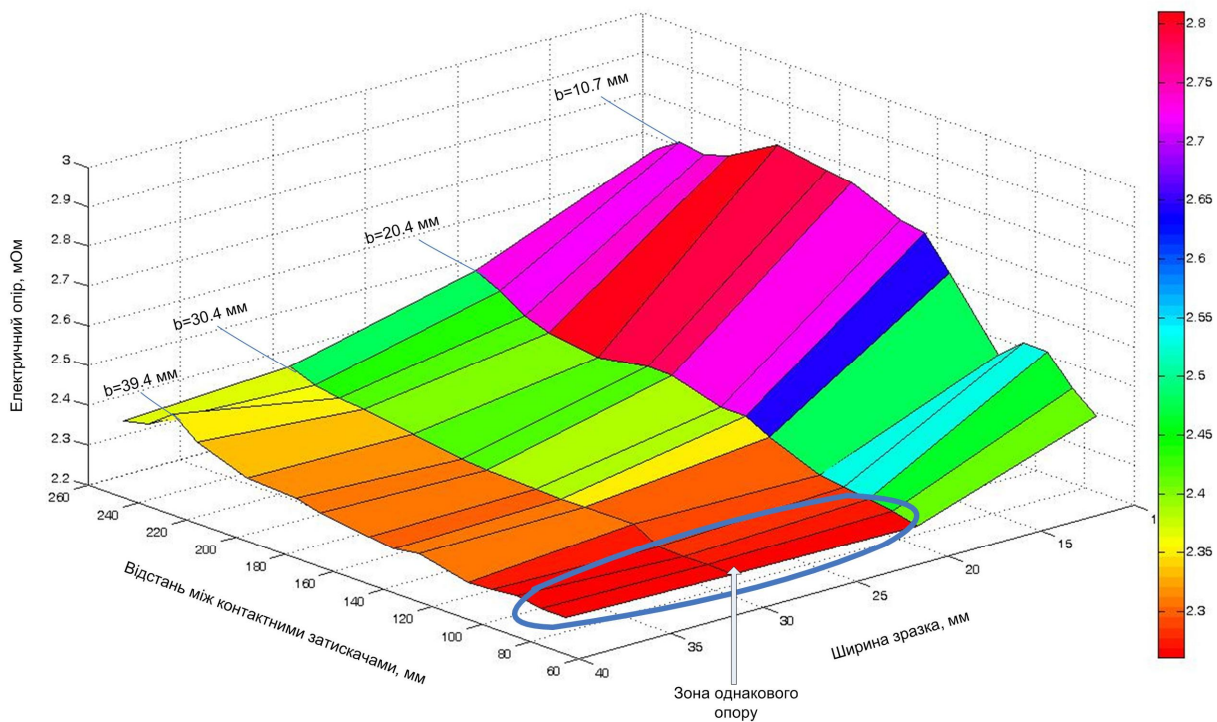
При цьому поверхневий опір можна записати:

$$R_S = K \cdot R, \quad (3)$$

де:  $K$  – геометричний поправочний коефіцієнт,  $R$  – вимірне значення електричного опору.

Таким чином,

$$\rho = K \cdot R \cdot h. \quad (4)$$



**Рисунок 5 – Тривимірна поверхня залежності електричного опору від відстані між контактними затискачами і ширини сталених зразків**

Прирівнюючи формули (1) та (4) і враховуючи, що  $S = b \cdot h$  ( $b$  – ширина зразка), одержимо вираз для розрахунку коефіцієнта  $K$ :

$$K = \frac{b'}{l'} \quad (5)$$

де:  $l'$  – відстань між контактними затискачами;  $b'$  – умовна ширина зразка.

Під умовною шириною  $b'$  зразка слід розуміти ту частину зразка, в якій густина постійного струму, що проходить крізь об'єкт, є найбільшою, і яка, власне, впливає на вимірне значення електричного опору. Фактично умовна ширина характеризує, яким чином струм розтікається в ширину і залежить від взаємного розміщення контактів.

Для цього проаналізуємо отримані експериментальним шляхом графічні залежності. Для кращої наочності було побудовано тривимірну поверхню залежності електричного опору від відстані та ширини зразків, зображену на рис. 5.

Загалом вираз для виміряного значення електричного опору можна представити як:

$$R = R_{np} + \frac{\rho}{h} \cdot \frac{1}{b'} \cdot l', \quad (6)$$

де  $R_{np}$  – перехідний опір контактного з'єднання.

Перший доданок  $R_{np}$  та перший множник другого доданка  $\frac{\rho}{h}$  у формулі (6) є сталими величинами. Більші значення виміряного опору для 1-го та 2-го зразків у порівнянні з 3-м та 4-м

зразками за однакового значення відстані між контактними затискачами вказують на те, що їх реальна ширина (відповідно  $b=10.7$  мм та  $b=20.4$  мм) менша за умовну ширину  $b'$  при однаковому значенні  $l'$  (див. форм. 6).

Криві залежностей електричного опору від відстані для 3-го та 4-го зразків практично збігаються, що свідчить про те, що для цих зразків умовна ширина є однаковою при одному фіксованому значенні  $l'$ . Отже, значення густини струму, який розтікається в ширину на відстань більше 30 мм, є невеликим. Це значить, що вимірювання електричного опору можна проводити і на повнорозмірних зразках, адже на значення електроопору буде пливати не вся ширина зразка, а тільки умовна ширина зразка  $b'$ .

Додатково можна спостерігати, що зі зменшенням відстані між контактними затискачами до 70-80 мм, умовна ширина стає однаковою для 2-го, 3-го та 4-го зразків, тобто  $10.7 < b' \leq 20.4$  мм для даного діапазону. Наглядно це можна спостерігати на рис.5 як вирівнювання значень електричного опору за малих значень відстані між затискачами (окреслена зона на рис. 5).

Нелінійний характер графічних залежностей (рис. 4, рис. 5) для великих значень  $l'$  може вказувати на вплив крайового ефекту або на нелінійність зв'язку умовної ширини та відстані між контактними затискачами. Проте очевидним є те, що із зменшенням відстані між контактними затискачами вимірне значення електричного опору також зменшується. Ступінь зменшення електричного опору з відстанню додатково залежить від умовної ширини зразків.

Таким чином, можна стверджувати, що вимірювання питомого електричного опору можна проводити на повно розмірних об'єктах, ширина яких може бути набагато більшою за умовну ширину  $b'$ , оскільки вимірне значення залежатиме тільки від умовної ширини зразків. При цьому оптимальна відстань між контактними затискачами повинна становити 60-80 мм. Для визначення значення геометричного поправочного коефіцієнта  $K$ , необхідно провести додаткові експериментальні дослідження за однієї фіксованої відстані між затискачами.

### **Література**

1 Старение труб нефтепроводов / А.Г.Гумеров, Р.С.Зайнуллин, К.М.Ямалеев, А.В.Росляков. – М.: Недра, 1995. – 218 с. – ISBN 5-8365-0125-4.

2 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 "МТ-2008": міжнародна науково-технічна конф., 5-7 червня 2008 р.: тези доповідей. – 2008. – С. 44-45.

3 Карпаш М.О. Новий 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.

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

5 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. – 130 с.

6 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.

7 Michael B. Heaney. Electrical Conductivity and Electrical Conductivity and Resistivity // The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook / Michael B. Heaney. – CRC Press LLC, 1999. – Chapter 43. – ISBN 084932145X.

8 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. – pp. 3549-3553.

*Стаття постуила в редакційну колегію  
26.01.10*

*Рекомендована до друку професором  
В. С. Костишиним*