

**Ю. В. ХОМЯК, В. Ю. ГОНТАР, Н. М. ЮДАНОВА, М. О. ЄФРЕМОВ**

### **РОЗПОДІЛ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОВЕРХНЕВОГО ДЕФЕКТА В МЕТАЛЕВОМУ ВИРОБІ**

В процесі роботи був розглянутий сучасний стан наукових досліджень електромагнітного поля дефекту. Наше дослідження відрізняється тим, що електромагнітне поле викликано за рахунок неоднорідного збудження лінійним струмом. Розроблено експериментальний стенд, за допомогою якого проводився дослід. Зроблено опис роботи експериментального стенду, а також опис таких елементів стенду: металевий зразок, датчик та система позиціонування. Приведені характеристики використовуваного сигналу. Приведена методика проведення дослідів. В результаті були отримані графіки розподілу електромагнітного поля поверхневого дефекту. Проведено аналіз графіків та зроблені висновки.

**Ключові слова:** поверхневий дефект, електромагнітне поле, вихровий струм, розподіл електромагнітного поля, неруйнівний контроль, об'єкт контролю, неоднорідне збудження лінійного струму.

**Ю. В. ХОМЯК, В. Ю. ГОНТАРЬ, Н. Н. ЮДАНОВА, Н. А. ЕФРЕМОВ**

### **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ИЗДЕЛИИ**

В процессе работы было рассмотрено современное состояние научных исследований электромагнитного поля дефекта. Наше исследование отличается тем, что электромагнитное поле вызвано за счет неоднородного возбуждения линейным током. Разработан экспериментальный стенд, с помощью которого проводился опыт. Сделано описание работы экспериментального стенда, а также описание таких элементов стенда: металлический образец, датчик и система позиционирования. Приведенные характеристики используемого сигнала. Приведена методика проведения эксперимента. В результате были получены графики распределения электромагнитного поля поверхностного дефекта. Проведен анализ графиков и сделаны выводы.

**Ключевые слова:** поверхностный дефект, электромагнитное поле, вихревой ток, распределение электромагнитного поля, неразрушающий контроль, неоднородное возбуждение линейного тока.

**Y. V. HOMYAK, V. Y. HONTAR, N. M. YUDANOVA, N. O. EFREMOV**

### **DISTRIBUTION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD OF SURFACE DEFECTS IN METALLIC PRODUCT**

In the process of work were considered the current state of scientific research of the electromagnetic field defect. Our research differs in that the electromagnetic field is caused due to heterogeneous linear excitation. An experimental test bench was developed. The description of the work of the experimental stand, as well as the description of such elements of the stand: metal sample, sensor and positioning system are made. The characteristics of the signal used are given. The method of conducting an experiment is given. As a result, graphs were obtained for the distribution of the electromagnetic field of the surface defect. The analysis of the graphs and the conclusions made are carried out.

**Keywords:** surface defect, electromagnetic field, vortex current, distribution of electromagnetic field, non-destructive control, control object, heterogeneous excitation of linear current.

**Вступ.** При сучасному рівні розвитку виробництва, постійно зростають вимоги до надійності та безпеки експлуатації складних, дорогих інженерних споруд та технічних систем, і тому вимагають проведення повного контролю якості продукції. Це тягне за собою підвищення вартості продукції. Але й економити на контролі якості продукції не варто, це може мати фатальні наслідки та призвести до великих аварій та екологічних катастроф, збитки від яких можуть бути дуже великими. Тому провідні держави світу витрачають значні кошти на контроль якості промислової продукції - в середньому 1-3% від вартості продукції і до 12-18% в таких галузях як літакобудування, атомна енергетика, ракетобудування.

Адже, основні елементи машин розраховуються на однаковий термін служби, після закінчення якого настає їх фізичний знос. На практиці часто доводиться зустрічатися з тим, що окремі частини виробів виходять з ладу раніше цього терміну. Причиною цього, як правило, є дефекти [1, 2], не виявлені в процесі їх виготовлення і контролю якості.

Для оцінки технічного стану об'єктів і вузлів на різних стадіях виробництва і експлуатації у багатьох

галузях промисловості широко застосовуються методи неруйнівного контролю [1 – 3]. У загальному розумінні неруйнівний контроль (НК) – це сукупність методів, технічних засобів та методики їх застосування для визначення показників якості матеріалів та виробів без порушення їх властивостей та функціонування. Він дає можливість перевірити якість деталей до залучення їх у збірку і тим самим не допустити використання дефектних деталей у конструкціях машин, а отже, запобігти аварії та катастрофи.

Дефекти в залежності від причин їх появи можуть бути конструктивними, виробничими (ремонтними), експлуатаційними [1]. Причинами виникнення дефектів є: недосконалість технологічних процесів виробництва або відновлення деталей, порушення режимів обробки, неефективність методів контролю якості, недотримання режимів і умов експлуатації, регламентованих нормативно-технічною документацією.

У виробництві металевих виробів часто зустрічаються поверхневі дефекти [1, 2, 4]. Вони представляють собою поверхні розділу між окремими зернами в полікристалічному металі. Вони малі в

одному вимірі і значно більші в двох інших. До цих дефектів належать границі зерен, границі фрагментів і блоків.

На сьогоднішній день існує безліч методів неруйнівного контролю, що дозволяють виявити ці дефекти. Однак найбільш краще в цьому плані показав себе вихрострумний метод [3 – 6]. Він заснований на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться збуджувальною котушкою в об'єкті контролю.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Основа теорії методу електромагнітного контролю була закладена в 30-х роках ХХ століття. В її основу лягли праці видатних вчених того часу Януса Р. В. [7 – 11], Аркадьєва В. К. [12], Вонсовського С. В. [13] і Грінберга Р. А. [14 – 16]. Одним з перших практичних застосувань методу став дефектоскоп-електромагніт призначений для контролю колісних пар вагонів та їх осей розроблений під керівництвом Карпова Ф. М. Крім того, у 1936 р. він запровадив дефектоскопічне обладнання для контролю рейок, засноване на новому на той час пондеромоторному методі. Обладнання встановлювалось на рухомому складі потяга. Подальшим розвитком і удосконаленням пондеромоторного методу НК займався Янус Р. В. В 30-ті роки питаннями, що виникають при використанні магнітних методів НК, займалися Міхєєв М. Н. і Акулов М. С.

Основним напрямком розвитку теорії стало рішення завдань формування магнітного поля дефекту. Постановку і рішення таких задач в загальному вигляді Янус Р. В. навів у своїх роботах [6 – 10]. Магнітне поле дефекту автор запропонував визначати за намагніченості матеріалу об'єкта контролю (ОК) проводячи оцінку сформованого поля розсіювання. При цьому враховуються значення як об'ємних, так і поверхневих зарядів. Була запропонована модель дефекту з апроксимуючим полем магніту еквівалентного неоднорідності. Модель враховує габарити досліджуваного дефекту і пропорційна його формам і розмірам. Намагніченість еквівалентного магніту приймається рівною намагніченості матеріалу ОК. Автором розглянуті можливі припущення та наближення, що застосовуються в обчисленнях і аналітичних розрахунках.

Аркадьєв В. К. у своїй статті про розвиток теоретичних основ магнітної дефектоскопії [12] запропонував інший, який став популярним, метод подання дефекту. Він сформулював основні завдання магнітної дефектоскопії і вперше показав, що поведінку поля при наявності дефекту можна розглядати по еквівалентній моделі дії диполя при наявності поля. Еквівалентний диполь, у відповідності з методом, має момент аналогічний моменту дефекту. А геометрично він розташований в центрі дефекту.

У 1938р. була опублікована стаття відомого вченого Вонсовського С. В. [13] в якій він виклав теоретичні основи дефектоскопії, засновані на

магнітному методі, і привів їх найпростіші розрахунки.

Подальшим розвитком теоретичних основ магнітної дефектоскопії займалися радянські вчені Сапожніков А. Б. [17, 18], Зацепін Н.Н. [19, 20] і Щербінін В. Е. [21, 22] та ряд інших дослідників. Серед імен зарубіжних вчених не можна не відзначити Фредеріка Форстера [23].

Велика кількість праць присвячена питанням формування магнітного поля дефектів. Встановлено, що воно визначається не тільки параметрами самих дефектів [7 – 16], але і нелінійністю магнітних властивостей матеріалу об'єкта. Нелінійність може визначатися в залежності від розв'язуваної задачі у зв'язку з впливом поверхні ОК [8, 13 – 15], формуванням в зоні дефекту магнітних зарядів [8, 9, 11] або за намагніченості [8, 13]. Отримані результати оцінки складових напруженості вторинного поля дефекту і значимість перерахованих факторів на поле дефекту [8, 13].

Великий внесок у вивчення полів розсіювання дефектів вніс Власов В. В. Грунтуючись на даних, отриманих при контролі нових (ненаклепаних) та вживаних (що наклепують) рейках він встановив, що на поля розсіювання поверхневого дефекту істотно впливають магнітні властивості матеріалу поблизу поверхні виробу. Так магнітотвердий матеріал у поверхні ОК сприяє збільшенню полів розсіювання в дефектів. Вірно і зворотне – наявність у поверхні м'якого в магнітному відношенні шару матеріалу викликає зменшення поля дефекту. Власов В. В. розвинув теорію Януса Р. І. стосовно внутрішніх дефектів магнітних металів [24]. Ним встановлено, що для магнітостатики поле дефекту несущільності створюється не тільки поверхневими зарядами на стінках дефекту, але і об'ємними зарядами, викликаними магнітною нелінійністю матеріалу ОК у найближчих до дефекту ділянках металу. При вивченні полів розсіювання від зовнішніх і внутрішніх дефектів Власов В. В. [24] підтвердив і розвинув ряд положень теорії магнітостатики Януса Р. І. Також він визначив, що для магнітних полів, величина яких набагато перевищує поле, що відповідає максимальної магнітної проникності матеріалу ОК, наявність об'ємних зарядів може зменшити поле дефекту.

Мужицький В. Ф., Шубочкін А. Е. [25] займалися вивченням магнітостатичного поля поверхневого дефекту кінцевої протяжності. Вони провели розрахунок для магнітного поля поверхневого дефекту з урахуванням його протяжності. Були отримані зручні для практики вирази для мінімального значення тангенціальної складової, за допомогою яких показано вплив довжини, глибини дефекту і величини робочого зазору на вимірюване поле дефекту. В результаті розроблено практичні рекомендації щодо обліку протяжності дефекту при створенні автоматизованих засобів неруйнівного контролю.

Вивченням магнітних полів внутрішніх та поверхневих дефектів в зварних валиках феромагнітного з'єднання займалися Зацепін Н. Н. і

Зацепін Е. Н. [26]. Вони аналітичними методами вирішили комплекс задач 1-го способу селективного вимірювання параметрів зварного валика феромагнітного з'єднання. В результаті їх роботи був отриманий розрахунок і наведено чисельні обчислення порогової глибини внутрішньої тріщини; встановлені кількісні залежності між відносним зростанням координати  $\Delta\hat{y}_{1,2}$  і безрозмірним параметром А; розроблено новий метод визначення зазору між вимірювальним датчиком і поверхнею зразка; встановлено критерій визначення можливого двох різних зазорів.

Також варто згадати поглиблене вивчення динамічного магнітного поля поверхневого дефекту Зацепіним Н. Н. [27]. На цю тему було написано декілька робіт. Ним було досліджено тангенціальна складова напруженості вторинного магнітного поля над порожниною дефекту. В ході дослідження були приведені аналітичні та чисельні розрахунки комплексної амплітуди для поздовжньо-складової напруженості магнітного поля з участю вихрових струмів. Проаналізовано основні характеристики дійсної та уявної складових в залежності від просторових координат, параметрів поверхневої тріщини, частоти перемагнічуючого поля, результати зіставлені з аналогічними залежностями.

Пашагін А. І. та Бенклевська Н. П. [28] вивчали виявлення поверхневих дефектів малого розкриття при магнітній дефектоскопії. Вони проводили дослідження магнітних полів дефектів типу порушення суцільності на зовнішній (з боку глядача) і внутрішній поверхнях феромагнітної пластини при вимірюванні над зовнішньою поверхнею. Було показано, що виявлення дефектів, розташованих на внутрішній від спостерігача поверхні, істотно залежить від їх ширини. Також ними була досліджена залежність магнітного поля дефекту від відстані до поверхні контрольованого виробу для дефектів типу прямокутної щілини. Для дефектів з малим розкриттям можна вважати, що їхнє магнітне поле зменшується обернено пропорційно цій відстані, але при збільшенні ширини дефекту поле спадає більш повільно.

Дослідженням можливості виявлення поверхневих дефектів у феромагнітних виробках піроелектромагнітним методом займалися такі вчені: Буличов О. А., Шлеенков С. А., Лисенко В. Р. та Шлеенков А. С. [29]. Вони запропонували новий метод виявлення поверхневих тріщин у феромагнітних металевих виробках за допомогою комбінованого намагнічування та визначення дефектних областей по температурному рельєфу на поверхні за допомогою інфрачервоної камери (тепловізора). Були викладені фізичні принципи роботи і методика контролю та наведені експериментальні дані, отримані на зразках із сталі з поверхневими мікротріщинами.

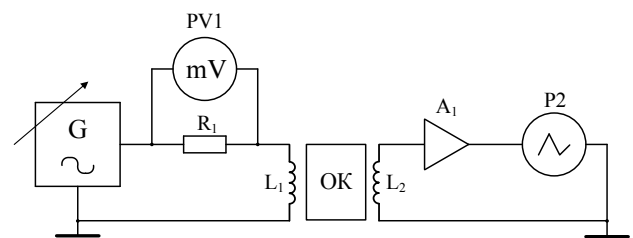
Гальченко В. Я., Остапушенко Д. Л. разом з Воробйов М. А. [30] вивчали комп'ютерний аналіз конфігурації магнітних полів поверхневих дефектів

суцільності кінцевих розмірів у феромагнітної пластини обмеженою протяжністю методом просторових інтегральних рівнянь. З використанням методу просторових інтегральних рівнянь проведено чисельний аналіз конфігурації магнітних полів у феромагнітних об'єктів обмеженою протяжністю з поверхневими дефектами суцільності кінцевих розмірів довільної форми. Визначено область застосування розробленого програмного забезпечення при проектуванні ефективних технічних засобів контролю об'єктів складної геометричної конфігурації.

Загідулін Р. В., Мужичький В. Ф. і Бизюлев А. Н. разом вивчали вплив кількості поверхневих дефектів в групі на їх магнітне поле. Вони розглядали вплив кількості поверхневих дефектів в групі на величину їх магнітного поля в повітрі над феромагнітним виробом.

**Мета дослідження.** На сьогоднішній день було проведено багато наукових досліджень електромагнітного поля дефекту [7–30], але у всіх випадках вважалося, що електромагнітне поле в металевому виробі було викликано однорідним збуджувальним полем. Наше дослідження розподілу електромагнітного поля дефекту відрізняється тим, що збудження неоднорідне, бо викликане за рахунок лінійного струму [31].

**Стенд для експериментального дослідження.** Для виконання досліджень був розроблений стенд (рис. 1), який включає: об'єкт контролю (ОК) із збуджувальною обмоткою ( $L_1$ ), система позиціонування, датчик ( $L_2$ ), генератор сигналів низькочастотний ГЗ-109 (G), мілівольтметр ВЗ-38Б (PV1), цифровий осцилограф SDS 1052DL (P2), лабораторний блок живлення, шунт ( $R_1$ ) з номінальним опором 1 Ом, підсилювач ( $A_1$ ). Для електричних підключень у схемі застосовувалися екрановані дроти з відповідним з'єднанням загальних провідників і корпусів приладів.



$L_1$  – збуджувальна обмотка;  $L_2$  – вимірювальна обмотка; G – генератор; PV1 – мілівольтметр;  $A_1$  – підсилювач;  $R_1$  – шунт; P2 – цифровий осцилограф; ОК – об'єкт контролю.

Рис. 1 – Блок-схема дослідного стенду

Стенд для досліджень працює наступним чином. Органами управління генератора G встановлюються параметри синусоїдальної напруги заданої частоти і амплітуди. Від генератора G сигнал надходить на збуджувальну обмотку  $L_1$ , при цьому мілівольтметром PV1 вимірюється падіння напруги на прецизійному

резисторі  $R_1$ , використуваного в якості шунта. Сигнал приймається на датчик з вимірювальною обмоткою  $L_2$  і подається на підсилювач  $A_1$ . За допомогою осцилографа P2 якісно та кількісно відстежується поведінка сигналу і його характер.

Оскільки в досліджуваній схемі використовується тонка обмотка (подача великого сигналу призведе до її згорання), тому на обмотку подається невеликий синусоїдальний сигнал силою струму 100 мА та частотою 200 кГц.

Експеримент проводився на плоскому зразку з вуглецевої сталі (рис. 2), виготовленій з підшви рейки. Зразок має штучний дефект 1 (рис. 2), виконаний електроерозійним способом [32]. На ОК перпендикулярно до штучного дефекту була намотана збуджувальна обмотка 2 (рис. 2), яка має 3 витки і була закріплена за допомогою ліпкої стрічки. Також до ОК за допомогою клею БФ-12 був зафіксований шматок склотекстоліту. До нього були припаяні кінці обмотки, а також дроти які підключалися до генератора сигналів.

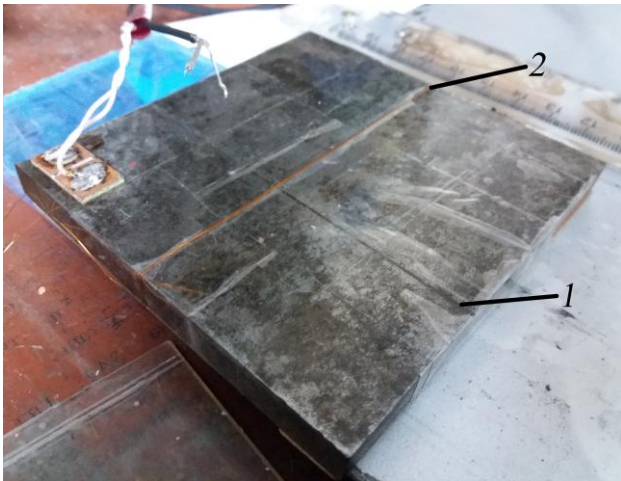


Рис. 2 – Зразок з вуглецевої сталі:

1 – штучний дефект; 2 – збуджувальна обмотка

Для проведення експерименту була задіяна система позиціонування (рис. 3). Система має дві ручки регулювання координат і лінійку. За допомогою цих ручок можна змінювати положення датчика в просторі. Перша ручка 1 (рис. 3) відповідає за переміщення в координаті  $X$ , а друга 2 (рис. 3) – в координаті  $Z$ . Також біля ручок регулювань є своя шкала довжини з різним діапазоном. Шкала що відноситься до першої ручки має діапазон 0–30 см, а діапазон другої шкали 60–130 см.

Лінійка зафіксована 3 (рис. 3) на металевій основі системи позиціонування за допомогою клею, оргскла і гвинтів. Вона має довжину 40 см і служить для відліку координати  $Y$ . Пересуваючи ОК вздовж лінійки можна заміряти, на яку відстань від початкової точки перемістився об'єкт в напрямку  $Y$ .

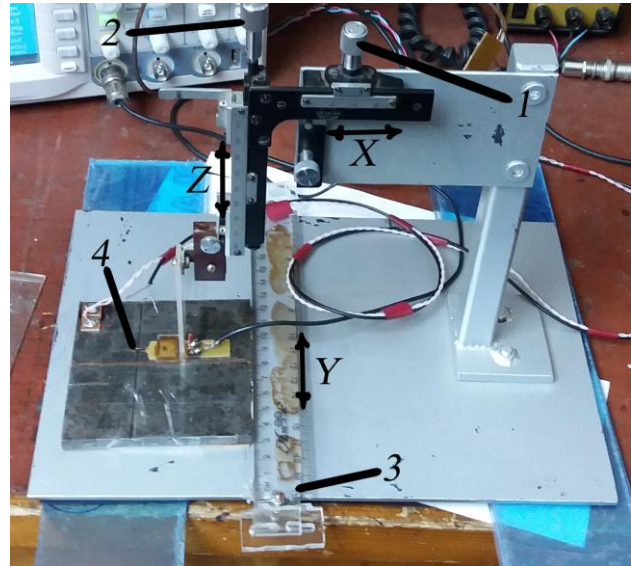


Рис. 3 – Система позиціонування:

1 – ручка регулювання координати  $X$ ; 2 – ручка регулювання координати  $Z$ ; 3 – лінійка; 4 – датчик

Датчик електромагнітного поля (рис. 4) являє собою котушку індуктивності, яка має 500 витків. Вона закріплена за допомогою клею на вирізану деталь з пластмаси і виступає в якості вимірювальної обмотки. Також за допомогою клею до деталі з пластмаси кріпиться шматок оргскла, зігнутого під прямим кутом, і вирізаний шматок склотекстоліту. До склотекстоліту були припаяні кінці обмотки, резистор з номінальним опором 100 Ом для узгодження вихідного опору датчика з вхідним опором підсилювача, а також дроти, які підключаються до підсилювача. За допомогою оргскла датчик 4 (рис. 3) кріпиться до системи позиціонування.

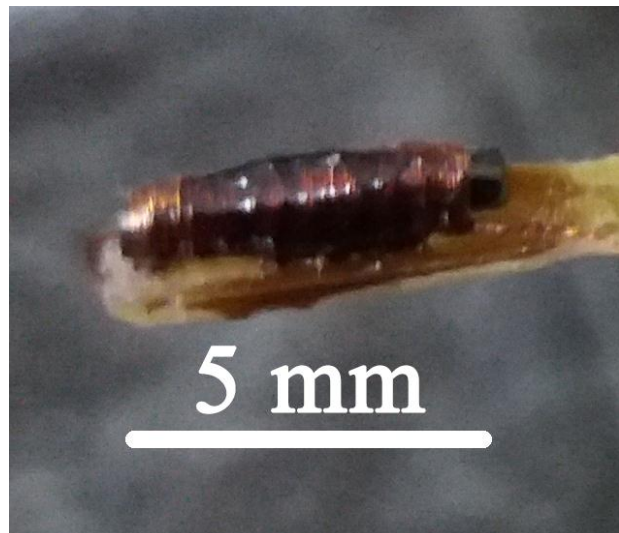


Рис. 4 – Датчик електромагнітного поля

#### Проведення експериментального дослідження.

Після підключення експериментального стенду до електричної мережі і налаштування апаратури можна було приступати до експерименту. Суть роботи

полягає в тому, щоб експериментальним шляхом отримати інформацію про те, як розподіляється магнітне поле поверхневого дефекту в просторі над поверхнею металевго виробу. Для цього потрібно заміряти магнітне поле на певній площі металевго виробу навколо дефекту.

Стартовими точками розташування датчика над дефектом були обрані наступні координати:  $X_0=13,5$ ;  $Y_0=86,5$ ;  $Z_0=85,5$ . Координата  $Z$  залишалася незмінною, а координати  $X$  і  $Y$  змінювалися в діапазоні  $\pm 10$  і  $\pm 20$  відповідно. Своє розташування

датчик змінював по площині  $X$  за допомогою ручки регулювання на системі позиціонування, а по площині  $Y$  за допомогою дослідника, який пересував металевий зразок вздовж зафіксованої лінійки. В одному значенні координати  $Y$  проводилися вимірювання при зміні 20-и значень координати  $X$ . Так робилося для всіх 40-а значень координати  $Y$ . В результаті проведеної роботи були побудовані графіки розподілу електромагнітного поля поверхневого дефекту на площині [33] та у просторі (рис. 5, а-б).

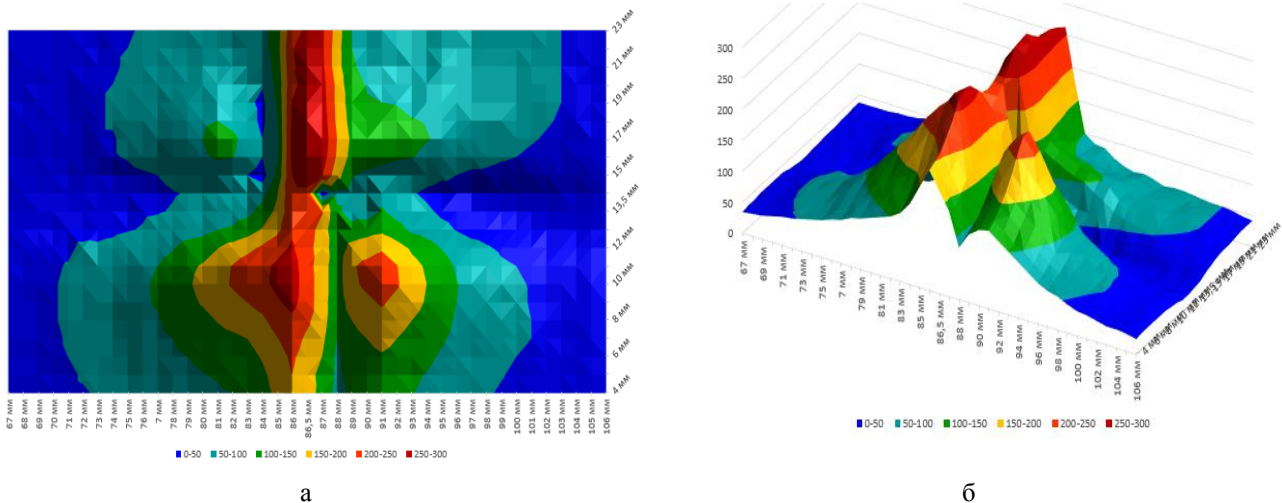


Рис. 5 – Розподіл електромагнітного поля:

а – вид на площині; б – вид у просторі

**Висновки.** Аналіз результатів експерименту показав, що очікувана симетричність відносно дефекта та струму збудження має певні недоліки, які пов'язані з точністю процесу сканування, встановлення датчика електромагнітного поля та реальною неоднорідністю електромагнітних параметрів металевго зразка.

Наступним етапом проведення експериментів є дослідження зразків з інших матеріалів та моделювання за допомогою методу кінцевих елементів.

#### Список літератури

- Білокур І. П. Основи дефектоскопії: Підручник. – К.: «Азимут-Україна», 2004.
- Незрушающий контроль. Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В. В. Клюева, Изд. 2-е, перераб. и испр. – М.: Машиностроение, 2006. (Серия Справочник).
- Ермолов И. Н., Останин Ю. А. Методы и средства неразрушающего контроля качества. – М.: Высшая школа, 1988. – 368 с.
- Незрушающий контроль металлов и изделий. Справочник под ред. Г. С. Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976.
- Г. М. Сучков Компьютерный вихретоковый дефектоскоп для автоматизированных систем контроля / Г. М. Сучков, Ю. В. Хомяк, С. Н. Глоба, А. Ю. Слободчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – 2015. – № 24(1133). – С. 131–137
- Сучков Г. М. Развитие возможностей вихретоковой дефектоскопии / Г. М. Сучков, Ю. В. Хомяк. // Методы та прилади контролю якості. – 2006. – №17. – с.3–7.
- Янус Р.И. Приближенное решение задачи магнитной дефектоскопии // Журнал технической физики. – 1935, – т. 5, – № 7, с. 1314-1315.
- Янус Р.И. Некоторые расчеты по магнитной дефектоскопии. // Журнал технической физики. – 1938, т. 8, № 4, с. 307.
- Янус Р.И. Некоторые вопросы теории магнитной дефектоскопии. // Журнал технической физики. – 1945, т. 15, № 1-2, с. 3-14.
- Янус Р.И. Магнитная дефектоскопия. – Гостехиздат, 1946, с.121-124.
- Янус Р.И. Задачи по магнитной дефектоскопии. Некоторые вопросы теории магнитной дефектоскопии. // Труды ИФМ АН СССР – 1948, № 7, с. 5-39.
- Аркадьев В.К. О развитии теоретических основ дефектоскопии. // Известия АН. 1937. № 2. С. 233-239.
- Вонсовский С.В. Простейшие расчеты для задач магнитной дефектоскопии// Журнал технической физики. – 1938, т. 8, № 16, с. 1453-1467.
- Гринберг Г.А. Об одном методе решения основной задачи электростатики и родственных ей проблем / Часть 1 // Журнал технической физики. – 1938, т. 8, № 3, с. 221
- Гринберг Г.А. Об одном методе решения основной задачи электростатики и родственных ей проблем. / Часть 2 // Журнал технической физики. – 1938, т. 9, № 6, с. 725
- Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. – М.: Изд. АН СССР, 1948.
- Сапожников А.Б. Исследование магнитных полей рассеяния от искусственных открытых дефектов. / Большаков П.Н., Сапожников А.Б. // Труды Сибирского физикотехнического института при ТГУ. – Томск, 1947, № 24, с. 246-251.

18. Сапожников А.Б. Теоретические основы электромагнитной дефектоскопии металлических тел. Т. 1. // Труды ИФМ АН СССР. – 1979, № 37, с. 68-74.
19. Зацепин Н.Н. Экспериментальные исследования топографии магнитного поля от естественных поверхностных дефектов в ферромагнитных телах. // Журнал технической физики. – 1954, т. 24, № 7, с. 1224.
20. Зацепин Н.Н. К расчету магнитостатического поля поверхностных дефектов. Топография полей моделей дефектов. / Зацепин Н.Н., Щербинин В.Е. // Дефектоскопия. – Свердловск, 1966, № 5, с. 50-58.
21. Щербинин В.Е. Исследование магнитных полей рассеяния от локальноклепанных участков изделия. / Зацепин Н.Н., Щербинин В.Е., Пашагин А.И. // Дефектоскопия – Свердловск, 1971, № 1, с. 88.
22. Щербинин В.Е. Об объемной поляризации трещины. / Щербинин В.Е., Пашагин А.И. // Дефектоскопия – Свердловск, 1974, № 4, с. 106-110.
23. Ферстер Ф. Неразрушающий контроль методом магнитных полей рассеяния. Теоретические и экспериментальные основы выявления поверхностных дефектов конечной и бесконечной длины. // Дефектоскопия. – 1982, № 11, с. 3-25.
24. Власов В.В. Исследования по дефектоскопии железнодорожных рельсов в движущихся магнитных полях. – Докторская диссертация, Свердловск, 1960.
25. Мужицкий В.Ф., Шубочкин А.Е. Магнитостатическое поле поверхностного дефекта конечной протяженности. // Контроль. Диагностика. М., 2007. № 12. С. 45-48.
26. Зацепин Н.Н. Магнитные поля внутренних и поверхностных дефектов в сварных валиках ферромагнитного соединения. // Контроль. Диагностика. М., 2010. № 9. С. 69-73.
27. Зацепин Н.Н. Динамическое магнитное поле поверхностного дефекта. // Контроль. Диагностика. М., 2004. № 4. С. 55-60.
28. Пашагин А.И., Бенклевская Н.П. Выявляемость поверхностных дефектов малого раскрытия при магнитной дефектоскопии. // Дефектоскопия. – 2013. № 1. С. 67-70.
29. Булычев О.А., Шлеенков С.А., Лисиенко В.Г., Шлеенков А.С. Исследование возможности обнаружения поверхностных дефектов в ферромагнитных изделиях пирозлектромагнитным методом. // Дефектоскопия. – 2010. № 4. С. 50-57.
30. Гальченко В.Я., Остапущенко Д.Л., Воробьев М.А. Компьютерный анализ конфигурации магнитных полей поверхностных дефектов сплошности конечных размеров в ферромагнитной пластине ограниченной протяженности методом пространственных интегральных уравнений. // Дефектоскопия. – 2009. № 3. С. 56-66.
31. Сучков Г. М. Распределение плотности вихревых токов в металлическом образце, возбуждаемых полем линейного тока / Г. М. Сучков, Ю. В. Хомяк, С. Н. Глоба, А. Ю. Слободчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – 2014. – №44 (1087). – С. 170 – 175.
32. Хомяк Ю. В. Электроэрозийная установка для изготовления моделей дефектов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – 2014. – № 5 (1048). – С. 99-105.
33. Хомяк Ю.В., Гонтар В. Ю. Розподіл електромагнітного поля поверхневого дефекта в металевому виробі // Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування. Матеріали І Міжнародної науково-технічної конференції. Серія: наукове видання. – 2017.– С. 115–116.
4. Non-destructive control of metals and products. Handbook ed. G. S. Samoilovich. - M.: Mechanical Engineering, 1976.
5. G. M. Suchkov. Computer eddy current flaw detector for automated control systems / G. M. Suchkov, Yu. V. Khomyak, S.N Globa, A. Yu. Slobodchuk // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific works. Series: Innovative Technologies and Materials Processing Equipment for Mechanical Engineering and Metallurgy. - 2015. - No. 24 (1133). - p. 131-137
6. Suchkov GM Development of eddy current flaw detection capabilities / GM Suchkov, Yu. V. Khomyak. // Methods and instruments of quality control. - 2006. - №17. - p.3-7
7. Janus R.I. Approximate solution of the problem of magnetic defectoscopy // Journal of Technical Physics. - 1935, - Vol. 5, - No. 7, p. 1314-1315.
8. Janus R.I. Some calculations on magnetic flaw detection. // Journal of Technical Physics. - 1938, v. 8, No. 4, p. 307.
9. Janus R.I. Some problems in the theory of magnetic flaw detection. // Journal of Technical Physics. - 1945, v. 15, No. 1-2, pp. 3-14.
10. Janus R.I. Magnetic flaw detection. - Gostekhizdat, 1946, p.121-124.
11. Janus R.I. Tasks for magnetic flaw detection. Some problems in the theory of magnetic flaw detection. // Proceedings of the Institute of Physics of the Academy of Sciences of the USSR - 1948, No. 7, p. 5-39.
12. Arkadiev V.K. On the development of the theoretical foundations of flaw detection. // Proceedings of the Academy of Sciences. 1937. № 2. P. 233-239.
13. Vonsovsky S.V. Simplest calculations for magnetic defectoscopy problems // Journal of Technical Physics. - 1938, v. 8, No. 16, p. 1453-1467.
14. Grinberg G.A. On a method for solving the basic problem of electrostatics and related problems / Part 1 // Journal of Technical Physics. -, 1938, v. 8, No. 3, p. 221
15. Grinberg G.A. About one method of solving the main problem of electrostatics and related problems. / Part 2 // Journal of Technical Physics. - 1938, Vol. 9, No. 6, p. 725
16. Grinberg G.A. Selected questions of the mathematical theory of electrical and magnetic phenomena. - Moscow: Izd. AN SSSR, 1948.
17. Sapozhnikov AB Investigation of magnetic scattering fields from artificial open defects. / Bolshakov PN, Sapozhnikov AB // Proceedings of the Siberian Physicotechnical Institute at TSU. - Tomsk, 1947, No. 24, p. 246-251.
18. Sapozhnikov AB Theoretical foundations of electromagnetic flaw detection of metal bodies. T. 1. // Proceedings of the Institute of Physics of the Academy of Sciences of the USSR. - 1979, no. 37, p. 68-74.
19. Zatsepin N.N. Experimental studies of the topography of the magnetic field from natural surface defects in ferromagnetic bodies. // Journal of Technical Physics. - 1954, Vol. 24, No. 7, p. 1224.
20. Zatsepin N.N. To the calculation of the magnetostatic field of surface defects. Topography of fields of defect models. / Zatssepin NN, Shcherbinin V.E. // Defectoscopy. - Sverdlovsk, 1966, No. 5, p. 50-58.
21. Shcherbinin V.E. Investigation of the magnetic scattering fields from the local-valued sections of the product. / Zatssepin NN, Shcherbinin VE, Pashagin AI // Defectoscopy - Sverdlovsk, 1971, No. 1, p. 88.
22. Shcherbinin V.E. On the volume polarization of a crack. / Shcherbinin VE, Pashagin AI // Defectoscopy - Sverdlovsk, 1974, No. 4, p. 106-110.
23. F. Foster, Nondestructive testing by the method of magnetic scattering fields. Theoretical and experimental basis for detecting surface defects of finite and infinite length. // Defectoscopy. - 1982, No. 11, p. 3-25.
24. Vlasov V.V. Investigations on flaw detection of railway rails in moving magnetic fields. Doctoral thesis, Sverdlovsk, 1960.
25. Muzhitsky VF, Shubochkin AE Magnetostatic field of a surface defect of finite length. // Control. Diagnostics. Moscow, 2007. No. 12. p. 45-48.
26. Zatssepin N.N. Magnetic fields of internal and surface defects in welded beams of a ferromagnetic compound. // Control. Diagnostics. Moscow, 2010. No 9. p. 69-73.
27. Zatssepin N.N. Dynamic magnetic field of a surface defect. // Control. Diagnostics. Moscow, 2004. No 4. P. 55-60.
28. Pashagin A.I., Benklevskaya N.P. Detection of surface defects of small opening in magnetic flaw detection. // Defectoscopy. - No. 1. No. 67-70.
29. Bulychev OA, Shleenkov SA, Lisenko VG, Shleenkov AS Investigation of the possibility of detecting surface defects in

#### References (transliterated)

1. Bilokur I.P. Fundamentals of Defectoscopy: Textbook. - K.: Azimut-Ukraine, 2004.
2. Non-destructive testing. Directory: In 8 tons. By common. Ed. VV Klyueva, Izd. 2nd, pererab. and correction - M.: Mashinostroenie, 2006. (Series Reference book).
3. Ermolov I. N., Ostanin Yu. A. Methods and means of non-destructive quality control. - M.: Higher school, 1988. - 368 pp.

- ferromagnetic products by the pyroelectromagnetic method. // Defectoscopy. - 2010. No 4. p. 50-57.
30. Galchenko VY, Ostapushchenko DL, Vorobiev MA Computer analysis of the configuration of magnetic fields of surface defects of continuity of finite dimensions in a ferromagnetic plate of limited extent by the method of spatial integral equations. // Defectoscopy. - 2009.No 3. p. 56-66.
31. Suchkov G.M Distribution of the density of eddy currents in a metal sample excited by a linear current field / GM Suchkov, Yu. V. Khomyak, S.N Globa, A. Yu. Slobodchuk // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific works. Series: Innovative Technologies and Materials Processing Equipment for Mechanical Engineering and Metallurgy. - 2014 - No 44 (1087). - P. 170 - 175.
32. Khomyak Yu. V. Electroerosion plant for manufacturing defect models // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific works. Series: Innovative Technologies and Materials Processing Equipment for Mechanical Engineering and Metallurgy. - 2014 - No. 5 (1048). - p. 99-105.
33. Khomyak Yu.V., Hontar V.Yu. Distribution of the electromagnetic field of a surface defect in a metallic product // Actual problems of automation and instrument making. Materials of the I International Scientific and Technical Conference. Series: Scientific Edition. - 2017.- p. 115-116.

Надійшла (received) 05.02.2018

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Хомяк Юрій Валентинович (Хомяк Юрий Валентинович, Homyak Yuriy Valentinovich)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: e-mail: [homyak.yv@gmail.com](mailto:homyak.yv@gmail.com)

**Гонтар Владислав Юрійович (Гонтарь Владислав Юрьевич, Hontar Vladyslav Yuriyovich)** – студент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: e-mail: [thesleroy@gmail.com](mailto:thesleroy@gmail.com)

**Юданова Ніна Миколаївна (Юданова Нина Николаевна, Yudanova Nina Mykolaevna)** – старший викладач кафедри Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: e-mail: [yudanova@kpi.kharkov.ua](mailto:yudanova@kpi.kharkov.ua)

**Єфремов Микита Олексійович (Ефремов Никита Алексеевич, Efremov Nikita Oleksijovich)** – студент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна.