

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ АКТИВАЦІЇ ПРИ ТЕРМОГРАФІЧНОМУ КОНТРОЛІ ДЕФЕКТІВ ТА СТРУКТУРНИХ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ В ФЕРОМАГНІТНИХ МАТЕРІАЛАХ*

М. І. БАЗАЛЄСВ, В. В. БРЮХОВЕЦЬКИЙ, В. Ф. КЛЕПІКОВ, В. В. ЛИТВИНЕНКО

Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, 61002, м. Харків,
вул. Чернишевська, 28. E-mail: ntcefo@yahoo.com

Розглянуто фізико-технічні основи термографічного контролю як неруйнівного методу структури феромагнітних матеріалів при активації електромагнітним полем та механізми формування температурних аномалій на неоднорідностях у металі шляхом перетворення частини електромагнітної енергії в тепло. Термопроявлення дефектних структур реєструються тепловізійними засобами контролю. Наведено принципову схему і технічні характеристики експериментальної електрофізичної установки для контролю структурних неоднорідностей у феромагнітних матеріалах за методом активної тепловізійної термографії. Беручи до уваги матеріали експериментальних досліджень, розроблено принципи ідентифікації температурних аномалій, створено науково-технічні основи електрофізичного тепловізійного методу. Библиогр.13, рис. 9.

Ключові слова: термографічний контроль, неруйнівний контроль, електромагнітна активація, термопроявлення дефектних структур, активна тепловізійна термографія

Активні термографічні методи неруйнівного контролю конструкційних матеріалів все більш поширюються в різних галузях промисловості у зв'язку з можливістю вибіркового розігріву дефектних ділянок або зон порушення суцільності матеріалу і реєстрації їх термопроявлення тепловізійними засобами контролю [1]. Ефективність методів у значній мірі залежить від вибору типу активуючої дії, енергетичний вплив від якої найбільш чутливий до зміни теплофізичних та електрофізичних характеристик в зонах порушення суцільності матеріалу. Природа утворення дефектів пов'язана перш за все з характеристиками матеріалу і умовами його експлуатації. При активному неруйнівному методі теплового контролю дефекти, що ідентифікуються, проявляються через температурний відгук на енергетичний вплив, якому піддається об'єкт дослідження. Завдяки розходженню теплофізичних властивостей основного матеріалу і сторонніх включень/дефектів при активації створюються теплові і температурні поля, які відображають структуру і стан об'єкта дослідження.

Тепловиділення в дефектній зоні можна ініціювати шляхом впливу на контрольований матеріал фізичним полем, наприклад, акустичним або електромагнітним (для феромагнітних матеріалів). При цьому інформативні параметри температурного поля (амплітуда, градієнт тем-

ператури, просторові характеристики розподілу термоаномалій) відображають особливості внутрішньої будови речовини, зокрема, наявність структурних неоднорідностей і дефектів з підвищеним розсіюванням енергії пружних хвиль або електромагнітної енергії у тепло. Це дозволяє виявляти несцільності (тріщини, пористість, сторонні включення) матеріалів, зміну їхньої структури і фізико-хімічних властивостей за зміною теплопровідності, теплоємності, коефіцієнта тепловіддачі неоднорідностей середовища.

Ефективність сучасних неруйнівних методів оперативного контролю деградаційних процесів в феромагнітних металах і сплавах може бути суттєво підвищена завдяки розвитку методів активного термографічного контролю із застосуванням енергії електромагнітних полів. Це може дати нові результати, які неможливо одержати, використовуючи лише теплову або акустичну активацію середовищ. Тому важливим є подальше вивчення різних аспектів взаємодії електромагнітних полів з дефектами кристалічної ґратки, проведення комплексного аналізу впливу дислокацій, точкових дефектів і різних побічних ефектів на процеси їх термопроявлення.

Основними напрямками удосконалення термографічних методів НК конструкційних матеріалів (металів) є підвищення температурної чутливості та часового розрізнення, оптимізація обчислю-

* По матеріалам роботи, виконаної в рамках цільової комплексної програми «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (2013–1015 рр.)

вальних процедур з одержаними термограмами та апробація різноманітних фізичних механізмів активації температурного поля в околі дефектної зони. Серед підходів до активації надлишкового тепловиділення в дефектній зоні феромагнетика з метою її подальшої реєстрації можна виділити метод, що ґрунтується на впливі на досліджуванний об'єкт електромагнітним полем. Метод заснований на зміні вихрових струмів і магнітних потоків, що збуджуються на неоднорідностях у метали, під впливом яких за рахунок перетворення частини електромагнітної енергії в теплоту формуються температурні аномалії, і принципах візуалізації температурних полів, що відображують внутрішню структуру (наявність дефектів) об'єктів контролю, стимульованих дією електромагнітних полів.

Втрати електромагнітної енергії на тепло обумовлені процесами перемагнічування (гістерезисні втрати) і втратами на вихрові струми (динамічні втрати). Механізм виникнення таких втрат пов'язаний зі зміною магнітної індукції за рахунок руху доменних стінок під дією магнітного поля і залежить від структурної неоднорідності матеріалу. Відповідно вихрові струми, що викликані перемагнічуванням магнітних матеріалів, впливають на питомі електричні втрати. Виникнення в сплаві будь-яких типів дислокацій веде до зростання питомого електричного опору, а їхнє зменшення знижує його. На величину і напрямок вихрових струмів у метали впливають його питомий електричний опір, частота електричного струму і магнітна проникність. Через дисипацію електромагнітної енергії на структурних неоднорідностях (міжфазних і міжзеренних границях, зонах концентрації напружень, мікротріщинах і порах) формується термозображення – картина просторового розподілу теплової енергії згідно з особливостями термопроявлення дефектної структури, стрибками теплофізичних параметрів, показників щільності і пружності матеріалів.

Принципи застосування електромагнітних полів в активній термографії. В існуючих методах електромагнітного активного термографічного контролю [2, 3] використовуються ефекти зміни теплофізичних та електрофізичних характеристик внаслідок порушення суцільності матеріалу. Частота електромагнітного поля виступає параметром, що задає глибину зондування. Зазначимо, що дані методики є перспективними для проведення тестових лабораторних досліджень, при цьому необхідно враховувати особливості процесів трансформації електромагнітної енергії активуючого впливу в теплову на структурних неоднорідностях в залежності від типу і електромагнітних властивостей металів, а також зміни їх структури під дією експлуатаційних чинників.

Фундаментальні теоретичні дослідження [4, 5] дозволяють визначити необоротні втрати електромагнітної енергії, що виділяється в матеріалі у вигляді тепла (втрати на гістерезис, динамічні втрати), вплив неоднорідності структури магнітного матеріалу на процеси зсуву (дроблення) стінок доменів і т.п. Величина магнітної енергії, що витрачена, залежить від частоти поля і властивостей матеріалу, його геометричних розмірів, а також втрат, пов'язаних з процесами релаксації магнітного моменту (спін-спінової і спін-ґраткової релаксації). Динамічні втрати пов'язані з вихровими струмами, індукованими в об'ємі матеріалу, і електричним опором матеріалу. Застосування цих ефектів і процесів в активній електрофізичній термографії є невід'ємною складовою розвитку неруйнівних методів теплової дефектоскопії металів.

Ефективність застосування методу для контролю структурних змін в феромагнітних матеріалах, які перебували під дією механічних навантажень, в значній мірі залежить від встановлення залежності тепловтрат від погіршення структури матеріалу за рахунок підвищеної щільності дислокацій, оцінки структурних змін в зонах з підвищеною щільністю дислокацій, що відбуваються в конструкційних матеріалах у результаті, наприклад, термічних і деформаційних навантажень. У реальних доменах джерелами магнітної анізотропії є внутрішні напруження, форма кристалітів і інші причини, які можуть бути виявлені при активації зразків змінним магнітним полем. Невід'ємною частиною цих досліджень є вивчення принципів ідентифікації температурних аномалій, активованих в зонах дефектоутворення на основі аналізу даних деградації теплофізичних властивостей матеріалів з урахуванням дії зовнішніх чинників, які створюють хибні температурні аномалії при термографічному контролі.

Приймаючи до уваги дані аналізу об'єктивно існуючих зв'язків характеристик матеріалу з параметрами зовнішнього впливу і залежність реакції на цей вплив від амплітудних і частотних характеристик зовнішнього впливу, метод термографічного контролю структурного стану матеріалів на основі електромагнітної активації є одним із найбільш перспективних методів структурної дефектоскопії феромагнітних тіл. Формування інформаційного поля ІЧ-випромінювання тіла, що активується, відбувається за рахунок як прямого перетворення електромагнітної енергії в теплову енергію на дефектних структурах, так і впливу дефектних структур на перерозподіл теплових потоків, що створені поверхневими вихровими токами індукції.

У магнітоупорядкованих твердих тілах при їхньому перемагнічуванні змінним магнітним по-

лем H частина електромагнітної енергії перетворюється в теплоту. Необоротне виділення тепла у феромагнітних і феримагнітних матеріалах у змінних магнітних полях широко відомий [6]. Перемагнічування феромагнетика в змінних магнітних полях завжди супроводжується тепловими втратами енергії, які обумовлені втратами на гістерезис і динамічні втрати. Динамічні втрати пов'язані з вихровими струмами, індукованими в об'ємі матеріалу, і залежать від електричного опору матеріалу, зменшуючись із ростом опору.

Втрати на гістерезис W (Дж/м³) (в одному циклі перемагнічування) визначаються площею петлі гістерезису

$$W = \int_0^{H_m} B(H) dH \quad (1)$$

і можуть бути обчислені для одиниці об'єму речовини за емпіричною формулою

$$\frac{W}{V} = \eta B_H^n, \quad (2)$$

де η – коефіцієнт залежний від матеріалу; B_H – максимальна індукція, що досягається протягом циклу; n – показник ступеня, рівний залежно від матеріалу 1,6...2,0.

Питомі втрати енергії на гістерезис P_Γ – втрати, витрачені на перемагнічування одиниці маси в одиниці об'єму матеріалу за секунду:

$$P_\Gamma = \frac{W}{mVT}, \quad (3)$$

де f – частота змінного струму; T – період коливань.

Питомі втрати на вихрові струми P_B можна визначити за такою формулою:

$$P_B = \frac{4B_m H_c f}{\gamma}, \quad (4)$$

де B_m – магнітна індукція; Тл; f – частота змінного струму, Гц; γ – щільність матеріалу пластини, кг/м³; H_c – коерцитивна сила.

Загальні питомі втрати на перемагнічування магнітом'яких матеріалів:

$$P = P_B + P_\Gamma = \frac{4B_m f}{\gamma} \left(\frac{B_m f d^2 k^2}{3\rho} + H_c \right), \quad (5)$$

де H_c – значення коерцитивної сили (наведено без урахування щільності дислокацій і концентрації доменів); d – товщина пластини, мм; k – коефіцієнт форми кривої магнітної індукції.

На коерцитивну силу на основі сучасної дислокаційної теорії магнітних властивостей матеріалів впливає взаємодія доменної і дислокаційної структур.

Для цього випадку коерцитивна сила може бути представлена у вигляді [7]:

$$H_c = 1,5 \frac{K\delta}{\mu_0 I_s D} e^{\frac{A+B}{2}} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{\frac{c_1}{2}} \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-\frac{c_2}{2}}. \quad (6)$$

Тут K – константа магнітної анізотропії; δ – товщина доменної стінки; μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м; I_s – спонтанна намагніченість; D – діаметр кристаліта; N – поточна щільність дислокацій; N_0 – максимальна щільність дислокацій; c_1 – стала для відношення щільності дислокацій; n – поточна концентрація доменів; n_0 – максимальна концентрація доменів; c_2 – стала для відношення концентрації доменів.

Загальні питомі втрати з урахуванням формули (5) можна представити такою формулою:

$$P = \frac{4B_m f}{\gamma} \left[\frac{B_m f d^2 k^2}{3\rho} + 1,5 \frac{K\delta}{\mu_0 I_s D} e^{\frac{A+B}{2}} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{\frac{c_1}{2}} \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-\frac{c_2}{2}} \right]. \quad (7)$$

Ця розрахункова формула питомих втрат для магнітних матеріалів залежно від щільності дислокацій і концентрації доменів підтверджується даними експериментальних досліджень.

Особливості термопроявлення структурних неоднорідностей в матеріалах при дії електромагнітних полів. Для вирішення найважливішої проблеми, пов'язаної з визначенням найбільш схильних до руйнування зон із граничним станом металу, можна використати зв'язок електрофізичних властивостей металів на рівні кристалічних ґраток з механічними властивостями, неоднорідностями структури, пружними і пластичними деформаціями і т. ін. [8]. В цьому випадку необхідно враховувати особливості процесів трансформації електромагнітної енергії активуючого впливу на структурних перетвореннях матеріалу під дією експлуатаційних чинників: розвинених дефектів, зон концентрації напружень на елементах конструкцій, у яких на рівні структури металу відбулися незворотні зміни. Кожна стадія процесу деформування і руйнування металу під дією стискаючих і розтягуючих зусиль, температури і т.д. може бути охарактеризована сукупністю електрофізичних параметрів, значення яких можуть бути виміряні та використані для виявлення і прогнозування в металевих конструкціях ділянок металу з неприпустимою величиною накопичених пошкоджень. Оскільки процеси деформації кристалічної структури, зародження і розвитку дефектів супроводжуються зміною електрофізичних властивостей металу [9, 10], доцільним стає активація металу електромагнітним полем, дисипація якого на структурних неоднорідностях приводить до відповідної

диференціації температурного поля, що відображає структуру зразка. У зв'язку з цим очевидним стає доцільність залучення методів термографічного контролю для аналізу структурного стану металів, враховуючи інтенсивний розвиток тепловісійної техніки, яка дозволяє проводити дослідження з високим температурним, просторовим та часовим розрізненням [1].

Утворення дефектів пов'язане як з характеристиками матеріалу, так і з умовами його експлуатації. Довга експлуатація виробів при високій температурі або короткочасний великий перегрів понад розрахункову температуру викликають зміни у мікроструктурі металу, які можуть носити як критичний характер, так і бути припустимими для даного сплаву чи металу. Важливим є не тільки виявлення уже наявних дефектів, а і прогнозування можливості їх утворення за тих чи інших умов експлуатації. Вміння ідентифікувати такі ділянки об'єктів і конструкцій за допомогою технологій тепловісійної інфрачервоної (ІЧ) радіометрії є актуальною задачею. Ідентифікація поверхневих температурних аномалій, які виникають в місцях існування внутрішніх дефектів, здійснюється на основі аналізу змін температурного поля на поверхні випромінювання тіл після електромагнітної активації.

Ефективність застосування методу для контролю структурних змін в феромагнітних матеріалах, які перебували під дією механічних навантажень, в значній мірі залежить від встановлення залежності тепловтрат від підвищення щільності дислокацій, оцінки структурних змін в зонах з підвищеною щільністю дислокацій, що відбуваються в конструкційних матеріалах у результаті, наприклад, термічних і деформаційних навантажень. Доменна структура феромагнетиків надзвичайно чутлива до будь-яких порушень правильності кристалічної будови [5]. Доменна границя може служити чутливим індикатором, здатним реагувати на невеликі зміни в структурі речовини, викликані релаксаційними процесами [11]. Точкові, лінійні і поверхневі дефекти ґраток, області неоднорідності напруженого стану, мікроструктурні елементи – границі зерен, включення різних фаз, неметалічні включення і пори, тріщини – все це впливає на доменну структуру [7, 8]. У реальних доменах джерелами магнітної анізотропії є внутрішні напруження, форма кристалітів і інші причини, які можуть бути виявлені при активації зразків змінним магнітним полем. Невід'ємною частиною цих досліджень є вивчення принципів ідентифікації температурних аномалій, активованих в зонах дефектоутворення на основі аналізу даних деградації теплофізичних властивостей матеріалів з урахуванням дії зовнішніх чинників, які створюють

хібні температурні аномалії при термографічному (тепловісійному) контролі [1].

Перемагнічування феромагнетика в змінних магнітних полях завжди супроводжується тепловими втратами енергії, які обумовлені втратами на гістерезис і динамічними втратами. Проведений аналіз [5, 9, 10, 12] показує, що існує зв'язок між параметрами магнітного гістерезису з параметрами структурних неоднорідностей феромагнітних сталей: розміром зерна, кількістю і розміром слабомагнітних і немагнітних включень, величиною і розподілом внутрішніх напружень та ін. У зв'язку із цим виникає питання про можливість рішення таких задач, як оцінка напружень у конструкційних сталях, виявлення ділянок пластичної деформації та ін.

Динамічні втрати, пов'язані з вихровими струмами, індукованими в об'ємі матеріалу, залежать від електричного опору матеріалу, зменшуючись з його ростом. Про зміну концентрації дефектів у матеріалі можна побічно судити за зміною питомого електричного опору. Виникнення в сплаві будь-яких типів дислокацій веде до зростання питомого електричного опору, а їхнє зменшення його знижує [7]. Питомий електричний опір феромагнетиків має високу чутливість до виникнення в структурі дефектів.

При пластичній деформації зі збільшенням величини деформації і ростом щільності дислокацій їхній розподіл стає істотно неоднорідним: дислокації утворюють компактні скупчення в площинах ковзання в зоні пластичної деформації. При активації тіла зовнішнім електромагнітним полем зона пластичної деформації може бути виявлена за даними параметрів її термопроявлення, які формуються під впливом зміни питомого електричного опору у зоні концентрації дислокацій, що співпадає з зоною пластичної деформації. Через дисипацію електромагнітної енергії на структурних неоднорідностях (міжфазних і міжзеренних границях, зонах концентрації напружень, мікротріщинах і порах) формуються термоаномалії, які здатні сформувати картину просторового розподілу теплової енергії згідно з особливостями термопроявлення дефектної структури, стрибками теплофізичних параметрів, показників щільності і пружності матеріалів.

Розвиток даного напрямку досліджень пов'язаний як з теоретичним обґрунтуванням взаємозв'язку структурного стану феромагнетиків з їхніми магнітними властивостями і тепловтратами при перемагнічуванні і застосуванням нових, більш ефективних теплофізичних ефектів, так і з можливістю контролю сучасними тепловісійними ІЧ-радіометричними засобами термопроявлення внутрішніх структур і дефектів у тілах при їхній активації електромагнітним полем.

Електрофізична установка для контролю структурних неоднорідностей у феромагнітних матеріалах за методом активної теплової зйомної термографії. Принцип дії електрофізичної установки базується на зміні вихрових струмів і магнітних потоків, що збуджуються електромагнітним полем на неоднорідностях у металі, під впливом яких за рахунок перетворення частини електромагнітної енергії в теплоту формуються поверхневі температурні аномалії [13]. Візуалізація температурних полів засобами термографічного контролю дозволяє виявити дефектні ділянки або зони порушення суцільності і структурних перетворень в матеріалах об'єктів контролю.

На рис. 1 представлено функціональну схему термографічного стенду для дефектоскопії феромагнітних матеріалів при активації електромагнітним полем. Основним конструкційним елементом установки є електромагнітний активатор (ЕМА) (рис. 2), у якому за допомогою полюсів магнітопроводу (ділянка магнітопроводу, що виступає за межі котушок індуктивності) створена робоча зона, у межах якої розміщується експериментальний зразок, на який діє електромагнітне поле, що «замикається» на полюси. При цьому тепловий стан (поле ІЧ-випромінювання) зразків у робочій зоні контролюється за допомогою ІЧ-камери (тепловізора). Електроживлення (струм i) індукційних котушок L_1 і L_2 ЕМА здійснюється через понижувальний трансформатор Тр.1, вихідна напруга u якого регулюється за допомогою автотрансформатора ЛАТР. Вихідні дані трансформатора Тр.1: напруга $u = (3 \dots 6)$ В, струм $i = (100 \dots 500)$ А, максимальна потужність 3,0 кВт. П-подібний сердечник (магнітопровід) ЕМА виготовлено з феромагнітного ма-

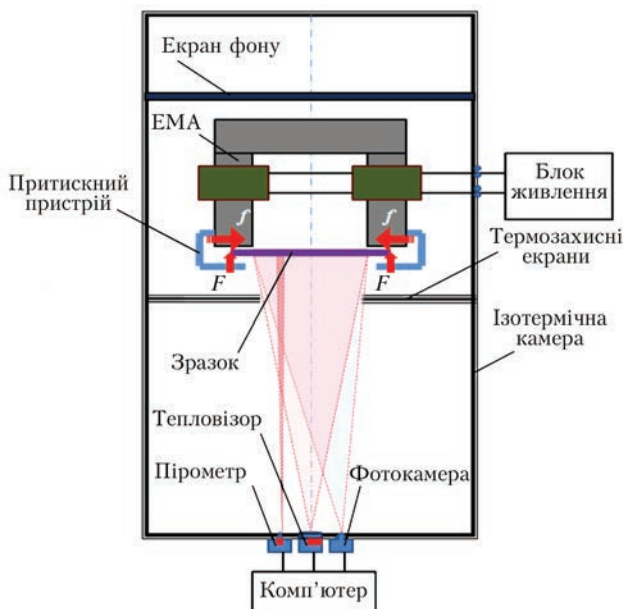


Рис. 1. Термографічний стенд для дефектоскопії феромагнітних матеріалів при активації електромагнітним полем

теріалу (шихтовані пластини з електротехнічної сталі з високою магнітною проникністю): поперечний переріз 70×80 мм2; відстань між полюсами магнітопроводу 180 мм; довжина полюсів 180 мм; маса магнітопроводу 45 кг. Магніторушійна сила котушок ЕМА (при полюсах магнітопроводу, що закорочені феромагнітним сердечником) – 1000...4000 амперів-витків (регулюється способом підключення котушок L_1 і L_2 (перемикач П) і величиною напруги u). Співвідношення активних і реактивної складових магнітних потоків у магнітопроводі регулюється активним опором RH у електричному колі навантажувальної котушки L_3 .

Обробка термозображень, отриманих за даними реєстрації поля ІЧ-випромінювання об'єкта дослідження, здійснюється на персональному комп'ютері ПК. При пропусканні змінного струму і через індукційні котушки L_1 , L_2 виникає змінний магнітний потік Φ , більша частина (Φ_0) з якого замикається в матеріалі сердечника, а менша частина (Φ_s – потік розсіювання) – по повітрю. Величина потоку, що проходить через зразок (Φ_2), значною мірою залежить від параметрів зразка (магнітної проникності, форми, розмірів, маси), а також величини магнітного опору в місцях «контакту» з полюсами сердечника, що утворюють робочу зону активації зразка електромагнітним полем.

Змінний магнітний потік, що пронизує феромагнітний зразок, індукує у матеріалі ЕРС, під дією якої виникають електричні (вихрові) струми I , що протікають по замкнених контурах, розташованих у площинах, які перпендикулярні напрямку магнітного потоку (що необхідно враховувати при виборі напрямку орієнтації зразка в робочій зоні щодо полюсів ЕМА). Вихрові струми, що протікають у матеріалі зразка, викликають його нагрівання, величина якого визначається як $I_F^2 r$ (закон Джоуля–Ленца), де I_F – діюче значення вихрових струмів, r – опір контуру, по якому вони замикаються. Для зразка, виготовленого у вигляді пластини з розмірами довжиною l , шириною h і товщиною d , розташованого щодо магнітного потоку в напрямку

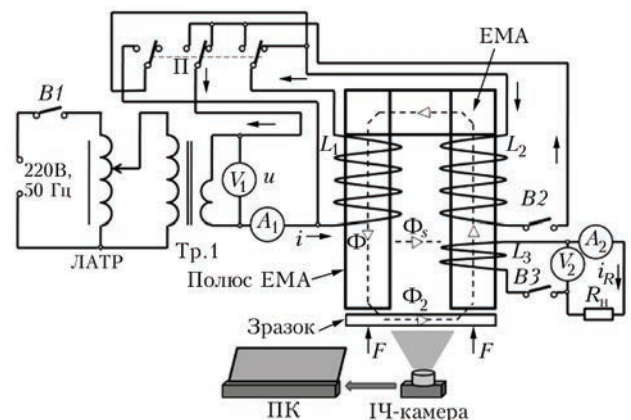


Рис. 2. Принципова схема блоку електромагнітної активації феромагнітних матеріалів

l , активна потужність P_F , що перетворюється у тепло вихровими струмами, визначається як [12]:

$$P_F = \frac{4}{3} \gamma k_f^2 d^2 \xi f^2 B_m^2 V = \xi f^2 B_m^2 V, \quad (8)$$

де $\xi = \frac{4}{3} \gamma k_f^2 d^2$ – коефіцієнт, величина якого залежить від коефіцієнта форми зразка k_f , питомої провідності матеріалу зразка, товщини перерізу зразка d ; f – частота змінного току; B_m – амплітуда індукції (щільність магнітного потоку); $V = hld$ (об'єм зразка).

Формула справедлива за умови, що $h \gg d$, при цьому втрати на вихрові струми залежать від товщини листа d , частоти змінного току (як f_2) і амплітуди індукції B_m .

Втрати P_H на перемагнічування зразка (гістерезисні втрати) можна визначити за формулою:

$$P_H = WH'f = h f B_m n, \quad (9)$$

де $W_H' = h B_m^n$ – втрати на один повний цикл перемагнічування в одиниці об'єму речовини (формула Штейнмеца); h – постійний коефіцієнт, що характеризує речовину зразка; n – показник ступеня, що залежить від амплітуди індукції.

Загальні втрати P_{FH} у зразку складаються із втрат на вихрові струми і перемагнічування:

$$P_{FH} = P_F + P_H = (\eta f + \xi f^2) B_m^2 V. \quad (10)$$

На низьких частотах переважають втрати на гістерезис. При високих частотах втрати на вихрові струми стають переважними.

Способи розташування досліджуваних зразків у робочій зоні ЕМА представлені на рис. 3. При закріпленні зразка до торців полюсів активатора із притискним зусиллям F (рис. 3, а, б) зразок знаходиться під впливом як електромагнітного поля, так і циклічних механічних напружень, які створюють полюси ЕМА за рахунок магнітострикційного ефекту (що визиває зміну лінійних розмірів магнітопроводу) і вібрації шихтованого заліза в змінному магнітному полі. Цей спосіб розташування і закріплення зразка цікавий тим, що дозволяє досліджувати синергетичний ефект термопроявлення структурних неоднорідностей при одночасній активації зразка різними за фізичною природою енергетичними полями.

На рис. 3, в, г показано варіанти розміщення і переміщення в робочій зоні ЕМА зразків з листового матеріалу (смуга) і труби відповідно.

На рис. 4 показано схему зміни розмірів робочої зони ЕМА за допомогою додаткових елементів магнітопроводу, що переміщуються. При проведенні експериментальних досліджень використовувалися ЕМА інших (оригінальних) конструкцій (рис. 5), які дозволяють розділити тепловтрати електромагнітної енергії в феромагнітних матеріалах на гістерезисні і динамічні (вихоротокові) втрати.

В активаторі (рис. 5) електромагнітне поле створюється плоскою індукційною котушкою з феромагнітним сердечником (розміри сердечни-

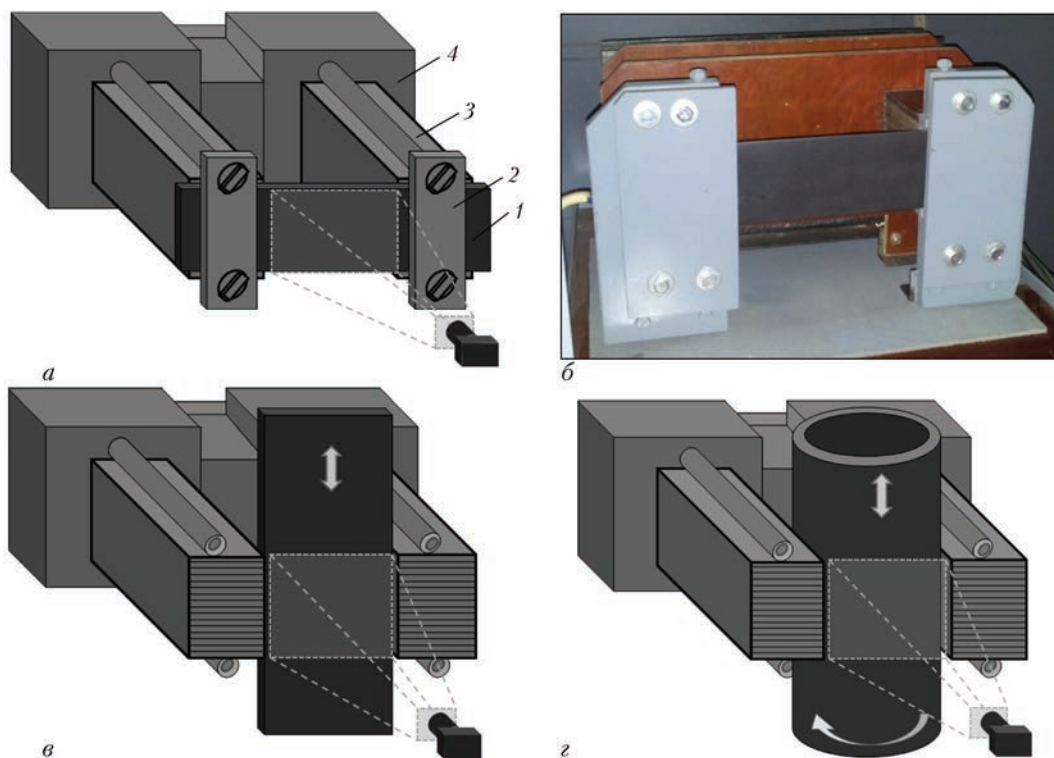


Рис. 3. Способи розташування досліджуваних зразків у робочій зоні ЕМА: а, б (фотозображення ЕМА) – зразок контактує з полюсами ЕМА з притискним зусиллям F (1 – зразок; 2 – притискний пристрій; 3 – полюс ЕМА; 4 – індукційна котушка); в – варіант розміщення і переміщення у робочій зоні ЕМА зразка з листового матеріалу; г – варіант розміщення і переміщення у робочій зоні ЕМА зразка

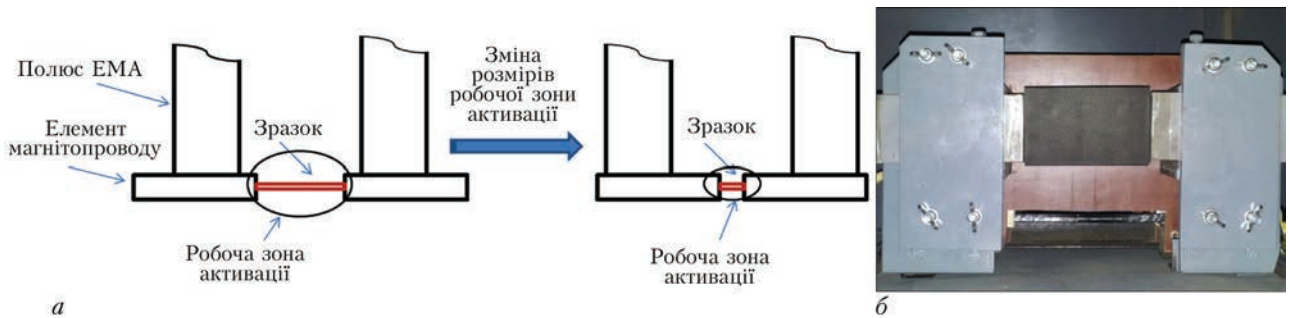


Рис. 4. Зміна розмірів робочої зони ЕМА: а – схема зміни розмірів робочої зони; б – фотозображення зразка в робочій зоні ЕМА з додатковими елементами магнітопроводу

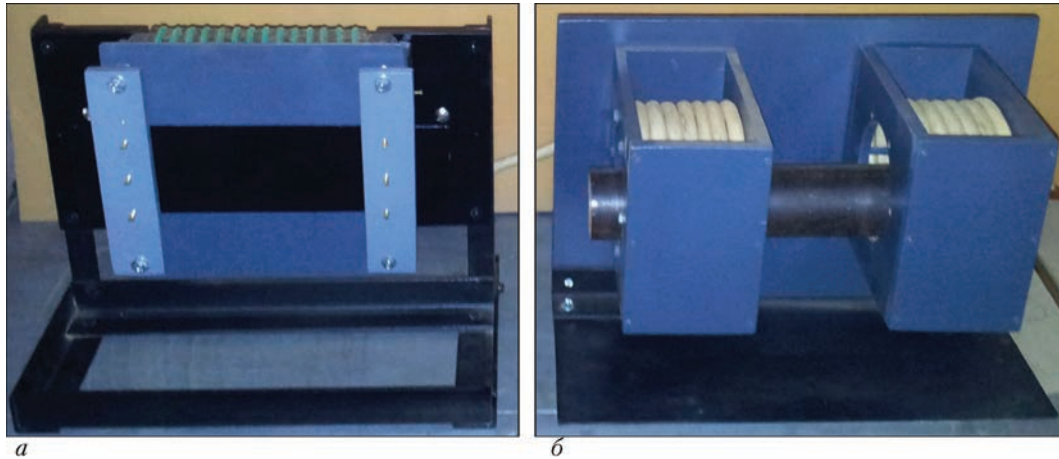


Рис. 5. Варіанти конструкцій ЕМА: а – активатор з плоскою індукційною котушкою (робоча зона 180×180мм²); б – активатор для циліндричних зразків (труба, пруток, профіль). Максимальний діаметр зразків 90 мм.

ка 180×180×16 мм³, магніторушійна сила котушки 1000...4000 амперів-витків), яке активує в пластині з феромагнітного матеріалу загальні питомі втрати. Застосування додаткових елементів магнітопроводу дає можливість виділити тепловтрати на гістерезис, які обумовлено проходженням магнітного потоку через зразок, що замикає створений феромагнітний магнітопровід.

В активаторі (рис. 6) електромагнітне поле двох індукційних котушок (магніторушійна сила котушок 1000...4000 амперів-витків) активує в зразку з феромагнітного матеріалу (який виконує функцію сердечника індукційних котушок) тепловтрати, які дозволяють реєструвати в робочій зоні ЕМА, що розташована між двома котушками, термопроявлення дефектних структур об'єкта дослідження.

Особливості термопроявлення дефектних структур при електромагнітній активації феромагнітних матеріалів. Дослідження особливостей термопроявлення дефектних структур в феромагнітних матеріалах проводилися на експериментальному стенді (див. рис. 1) в ізотермічній камері з вбудованою системою теплозахисних екранів, які захищають об'єкт дослідження від впливу сторонніх джерел ІЧ-випромінювання на формування хибних термоаномалій. Енергетичний режим роботи ЕМА не перевищував 50 % максимальної потужності установки і не був

оптимізований для рішення конкретної задачі. У якості ІЧ-камери використовувався тепловізор FLUKE Ti32 (температурне розрізнення 0,045 °С при 30 °С; поле зору 23°×17°; просторове розрізнення 1,25 мрад; мінімальна фокусна відстань 0,15 м; спектральний діапазон ІЧ-випромінювання, що реєструється, 8...14 мкм). Для виміру температури на опорних точках об'єкту обстеження застосовувався ІЧ фотопірометр Fluke 576 з роздільною здатністю по температурі до 0,01 °С.

На рис. 6–9 наведені термозображення і термограми експериментів, що демонструють термопроявлення різних видів штучно створених дефектів при активації зразків з феромагнетиком в робочій зоні ЕМА. В якості штучно створених дефектів використовувалися циліндричні отвори діаметром 3...12,0 мм в пластині з феромагнітного матеріалу (товщина пластини 1,5...6,0 мм), в які запресовано і зашліфовано діелектричну речовину, сталь, мідь, латунь, графіт та нанесено лакофарбове покриття.

На рис. 6 показано термопроявлення різних видів штучно створених дефектів у зразку з феромагнетиком (пластина 80×70×2 мм³, сталь 30) при активації зразка в робочій зоні ЕМА без контакту з полюсами. Як видно з термограми 4, при електромагнітній активації зразка протягом 11...18 с перевищення амплітуди термоаномалій в області дефектів D_1 (графіт), D_2 (мінеральна суміш) і D_3 (сталь) щодо фоно-

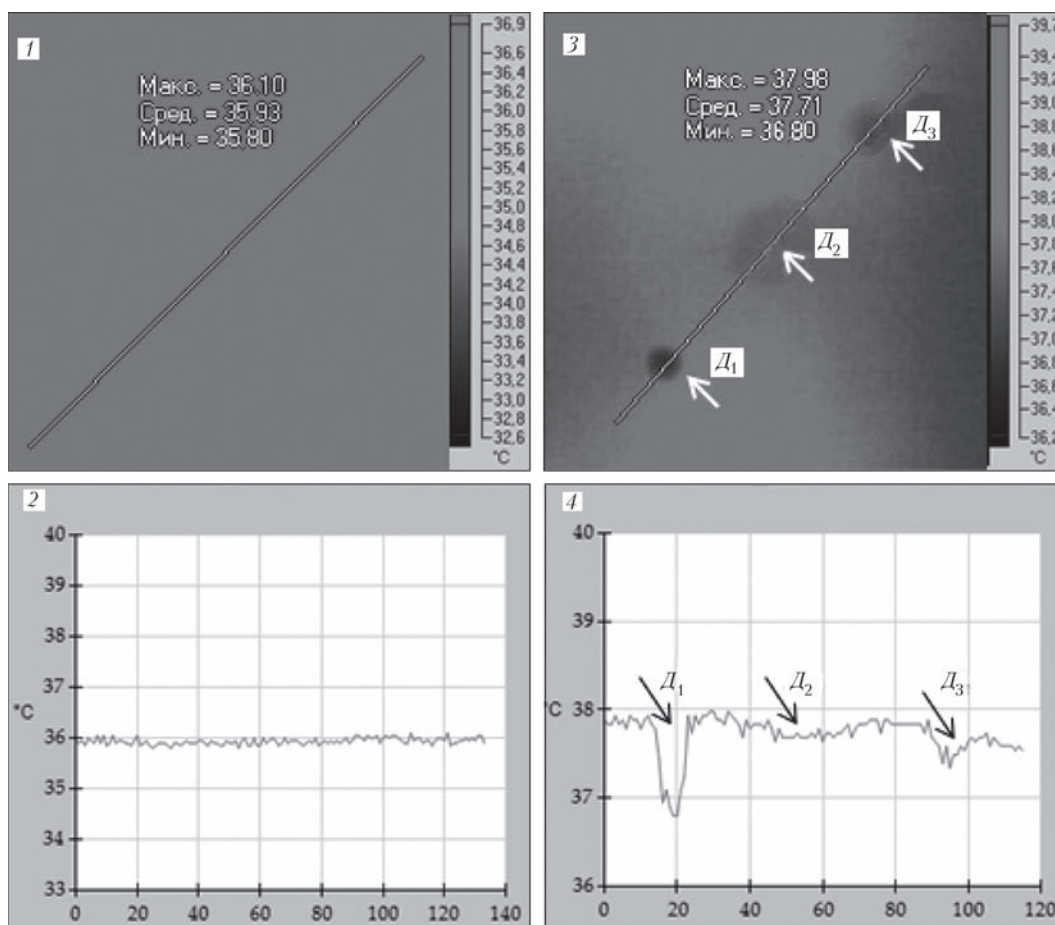


Рис. 6. Термопроявлення штучно створених дефектів у зразку з феромагнетика (пластина $80 \times 70 \times 2 \text{ мм}^3$, сталь сталь 30) при активації в ЕМА: 1 і 2 – термозображення і термограма (уздовж лінії, що перетинає місце розташування дефектів) зразка до початку електромагнітної активації; 3 і 4 – термозображення і термограма (уздовж лінії, що перетинає місце розташування дефектів) зразка під час електромагнітної активації

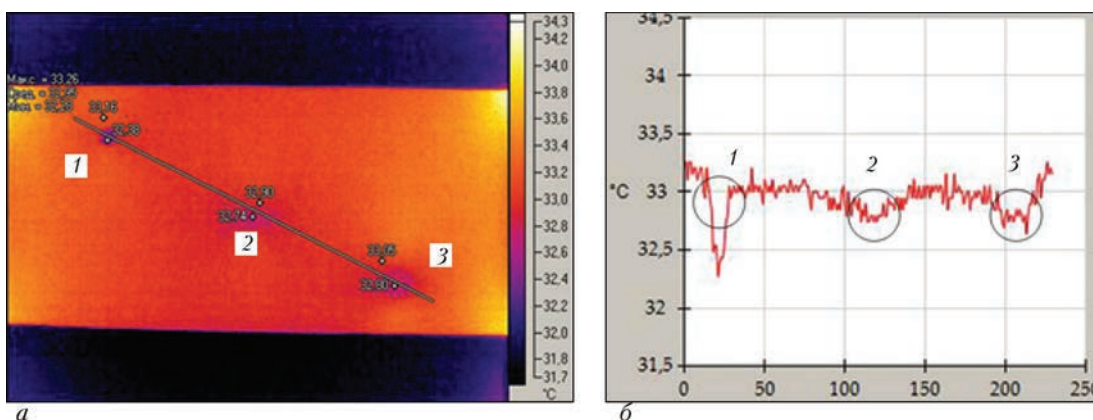


Рис. 7. Термопроявлення штучно створених дефектів (зразок – пластина $300 \times 80 \times 2 \text{ мм}^3$, сталь 30) при активації в ЕМА (зразок контактує з полюсами) протягом 9 с): 1 – графіт; 2 – латунь; 3 – мідь

вої температури досягає значень $1,0 \dots 1,2$, $0,2 \dots 0,35$ і $0,4 \dots 0,68 \text{ }^\circ\text{C}$ відповідно в залежності від теплофізичних властивостей і розмірів штучно створених дефектів.

На рис. 7 показано термопроявлення аналогічних дефектів (1 – графіт, діаметром 6 мм; 2 – латунь, діаметром 6 мм; 3 – мідь, діаметром 10 мм) на пластині ($300 \times 80 \times 2 \text{ мм}^3$, сталь 30) з нанесеним лакофарбовим покриттям при активації в ЕМА за схемою контакту зразка з полюсами. Амплі-

туда негативних термоаномалій на дефектах 1, 2 і 3 (рис. 7, б) досягає $0,78 \dots 1,0$, $0,16 \dots 0,25$ і $0,25 \dots 0,35 \text{ }^\circ\text{C}$ відповідно при активації зразка протягом 9...16 с. Значне зниження амплітуди термоаномалій на дефектах з латуні і міді відносно дефекту, який сформовано діелектричною речовиною, пояснюється великою теплопровідністю цих металів, що значно знижує градієнт температури на межі розподілу феромагнетика і неферомагнітного матеріалу дефекту.

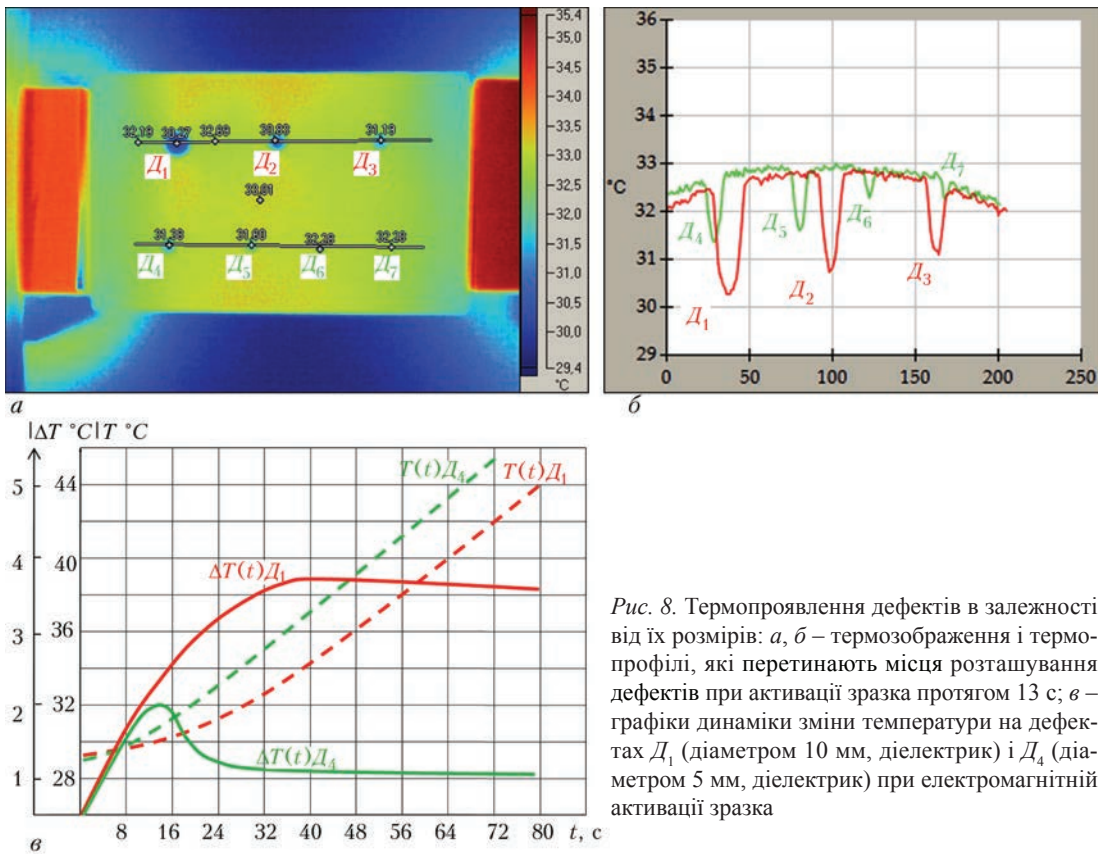


Рис. 8. Термопроявлення дефектів в залежності від їх розмірів: а, б – термозображення і термопрофілі, які перетинають місця розташування дефектів при активації зразка протягом 13 с; в – графіки динаміки зміни температури на дефектах D_1 (діаметром 10 мм, діелектрик) і D_4 (діаметром 5 мм, діелектрик) при електромагнітній активації зразка

Залежність теплофізичних параметрів термопроявлення дефектів від їх розмірів проілюстровано на рис. 8. Зразок – пластина $130 \times 80 \times 6$ мм³, сталь 30. Дефекти D_1 – D_7 – це циліндричні отвори діаметром 10; 7; 6; 5; 4; 5; 3 і 2 мм відповідно, в які запресовано і зашліфовано діелектричну речовину та на поверхню зразка нанесено лакофарбове покриття. Зразок активувався електромагнітним полем протягом 80 с за схемою на рис. 4. Як видно із термозображень і термопрофілей (рис. 8, а, б), амплітуда негативних термоаномалій залежить від розмірів дефектів, які рееструються. Динаміку зміни амплітуди термоаномалій на дефектах D_1 (діаметром 10 мм) і D_4 (діаметром 5 мм) показано на графіках (рис. 8, в). Для дефекту D_1 амплітуда термоаномалії стабілізується на 36 с дії активації і досягає $3,6 \dots 3,7$ °C. Максимальне значення амплітуди термоаномалії на дефекті D_4 досягається на 14 с дії активації (2 °C) і встановлюється на рівні 1,1 °C на 32 с дії активації.

На рис. 9 показано термопроявлення дефектів на зразку (пластина $130 \times 80 \times 2$ мм³, сталь 30), товщина якого у два рази менша за товщину зразка, який розглянуто вище (див. рис.8), а умови електромагнітної активації однакові. Циліндричні отвори дефектів D_1, D_3 – D_8 (діаметром 10; 6; 5; 7; 3; 2 і 5 мм відповідно) заповнені діелектричною речовиною, дефект D_2 (діаметр 6 мм) – сталлю У7. Як видно із термозображень (рис. 9, в, г) дефект,

який сформований феромагнітним матеріалом (сталь У7) має значно меншу амплітуду термопроявлення, ніж діелектричні дефекти.

Динаміку зміни амплітуд термоаномалій на дефектах D_1 (діаметром 10 мм, діелектрик), D_2 (діаметром 5 мм, сталь У7) і D_4 (діаметром 5 мм, діелектрик) показано на графіках (рис. 9, б). Для дефекту D_1 амплітуда термоаномалії стабілізується на 32 с дії активації і досягає $3,7 \dots 3,9$ °C. Максимальне значення амплітуди термоаномалії на дефекті D_4 досягається на 20 с дії активації (1,3 °C) і встановлюється на рівні $1,2 \dots 1,25$ °C на 25 с дії активації. На дефекті D_2 максимальне значення амплітуди термоаномалії досягається на 15 с дії активації (0,22 °C) і стабілізується на 35 с на рівні 0,12 °C (практично на рівні чутливості тепловізора). Досить малий рівень амплітуди термопроявлення «феромагнітного дефекту» (відносно діелектричного) можна пояснити як впливом на процес формування температурної аномалії високої теплопровідності матеріалу дефекту, так і «підігрівом» дефекту за рахунок втрат електромагнітної енергії на гістерезис. Очевидно, що в даному випадку питомі втрати на гістерезис у матеріалі штучно виготовленого дефекту становлять меншу величину, ніж на феромагнітному зразку, тому температура дефекту нижча за температуру зразка, що і є причиною формування негативної термоаномалії. Штучно створений «феромагнітний дефект» можна роз-

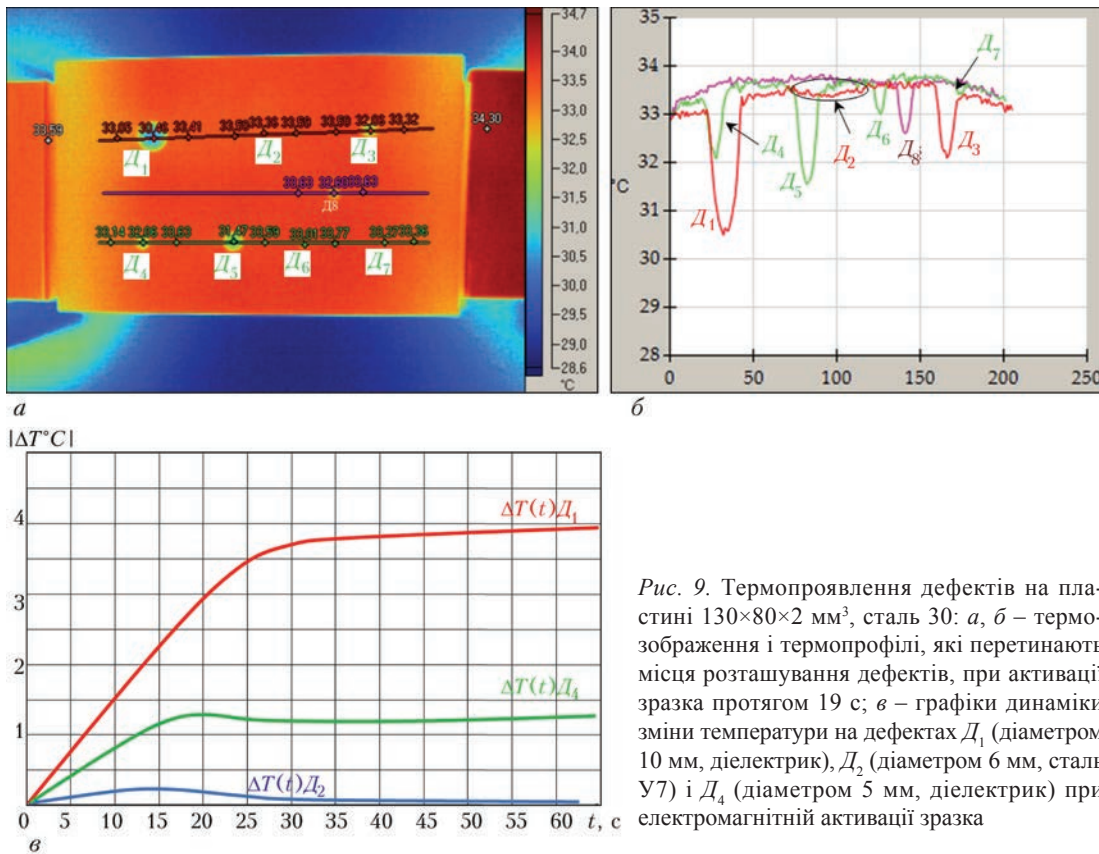


Рис. 9. Термопроявлення дефектів на пластині $130 \times 80 \times 2$ мм³, сталь 30: а, б – термообразиження і термопрофілі, які перетинають місця розташування дефектів, при активації зразка протягом 19 с; в – графіки динаміки зміни температури на дефектах D_1 (діаметром 10 мм, діелектрик), D_2 (діаметром 6 мм, сталь У7) і D_4 (діаметром 5 мм, діелектрик) при електромагнітній активації зразка

глядати як імітацію дефекту структурної неоднорідності феромагнітного матеріалу, який (як свідчить експеримент) можна виявити засобами термографічного контролю при електромагнітній активації зразка.

Висновки

Оснoву розглянутого методу активного термографічного контролю складають принципи візуалізації температурних полів, що збуджуються на неоднорідностях феромагнітного матеріалу і відображують внутрішню структуру (наявність дефектів) об'єктів контролю за рахунок перетворення частини електромагнітної енергії в тепло.

Втрати електромагнітної енергії на тепло обумовлені процесами перемагнічування (гістерезисні втрати) і втратами на вихрові струми (динамічні втрати). Механізм виникнення таких втрат пов'язаний зі зміною магнітної індукції за рахунок руху доменних стінок під дією магнітного поля і залежить від структурної неоднорідності матеріалу.

Виникнення в матеріалі будь-яких типів дислокацій веде до зростання питомого електричного опору, а їхнє зменшення знижує питомий електричний опір. На величину і напрямок вихрових струмів у металі впливають його питомий електричний опір, частота електричного струму, магнітна проникність і конструкційні особливості зразка, а також його розташування відносно напрямку магнітного потоку.

Використання електромагнітної енергії для активації термопроявлення дефектів у тепловому полі істотно підвищує ефективність використання термографічного методу для виявлення дефектів на ранній стадії їхнього виникнення. Метод дозволяє виявляти структури з підвищеною щільністю дислокацій, робити оцінку структурних змін, що відбуваються в конструкційних матеріалах у результаті, наприклад, термічних і деформаційних навантажень.

Експериментальні дослідження, проведені із застосуванням електрофізичної установки підтверджують, що через дисипацію електромагнітної енергії на структурних неоднорідностях (міжфазних і міжзеренних границях, зонах концентрації напружень, мікротріщинах і порах) формуються термоаномалії, які відтворюють картину просторового розподілу теплової енергії згідно з особливостями термопроявлення дефектної структури, стрибками теплофізичних параметрів, показників щільності і пружності матеріалів.

Розроблене у процесі виконання наукових досліджень експериментальне обладнання і методологія його застосування мають самостійне значення і можуть використовуватися при лабораторних дослідженнях як активний термографічний метод НК (дефектоскопії) феромагнітних конструкційних матеріалів із застосуванням електромагнітної активації.

1. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.
2. Vrana J. Mechanisms and models for crack detection with induction thermography / J. Vrana, M. Goldammer, J. Baumann, M. Rothenfusser [et al.] // Review of Quantitative Nondestructive Evaluation. – 2008. – Vol. 27. – P. 475–482.
3. Mukhopadhyay S. C. A review of material properties estimation using eddy current testing and capacitor imaging Mohd. Amri Yunus / S.C. Mukhopadhyay, G. Sen Gupta // Sensors & Transducers Journal. – 2009. – Vol. 100. – Issue 1. – 2009. P. 92–115.
4. Ландау Л. Д. Электродинамика сплошных сред Теоретическая физика. – [2-е изд.] пер. и доп. Е. М. Лифшицем и Л. П. Питаевским / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982. – Т. VIII. – 621 с.
5. Hubert A. Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures / A. Hubert, R. Schäfer // Springer, 1998. – 696 p.
6. Вонсовский С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М.: Наука, 1984. – 208 с.
7. Тимофеев И. А. Удельные потери в ферромагнетике / И. А. Тимофеев // Современные проблемы науки и образования. – 2007. – № 6 – С. 136–142.
8. Rosakis P. A thermodynamic internal variable model for the partition of plastic work into heat and stored energy in metals / P. Rosakis, A. J. Rosakis, G. Ravichandran, J. Hodowany // Journal Mech. and Phys. Solids. – 2000. – № 48. – P. 581–607.
9. De Lacheisserie, É. Magnetism: Fundamentals / É. De Lacheisserie, D. Gignoux, M. Schlenker. – Springer, 2005. – V.1. – 507 p.
10. Maugin G. The Thermomechanics of Plasticity and Fracture / G. Maugin. – Cambridge: Cambridge University Press, 1992. – 350 p.
11. Хуберт А. Теория доменных стенок в упорядоченных средах / А. Хуберт. – М.: Мир, 1977. – 306 с.
12. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения / С. Тикадзуми; пер. с япон. – М.: Мир, 1987. – 497 с.
13. Базалеев М. І. Термографічний контроль структурних порушень в ферромагнітних матеріалах при активації електромагнітним полем / М. І. Базалеев, В. В. Брюховецький, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2014. – № 3(37). – С. 13–17.

Considered are the physical-technical basics of thermographic testing as a non-destructive method for examination of structure of ferromagnetic materials at activation by electromagnetic field and mechanisms of formation of temperature anomalies over inhomogeneities in metal by means of transformation of part of electromagnetic energy in heat. Thermal imagining means are used for registration of heat developable defect structures. The principal scheme and technical characteristics of experimental electro-physical unit for testing of structural inhomogeneities in ferromagnetic materials using the method of active thermal imagining thermography are given. Taking into account the materials of experimental investigations, the principles were developed for identifying the temperature anomalies, scientific-technical basics of electro-physical thermal imagining method were generated. *Ref. 13, Figures 9.*

Keywords: thermographic testing, non-destructive testing, electromagnetic activation, heat development of defect structures, active thermal imaging thermography.

Поступила в редакцию
26.04.2016

ПОДПИСКА — 2017 на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
240 грн.	480 грн.	1800 руб.	3600 руб.	30 дол. США	60 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Подписку на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Прессцентр», «Информнаука», «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).

Подписка на электронную версию журнала
«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»
на сайте: www.patonpublishinghouse.com.

Правила для авторов: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/rules
Лицензионное соглашение: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/license
В 2016 г. в открытом доступе архивы статей журнала за 2003–2014 гг.

Контакты:
Тел./факс: (38044) 205-23-90; 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Подписано к печати 30.05.2016. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 8,54. Усл.-отт. 8,96. Уч.-изд. л. 9,14
Печать ООО «Фирма «Эссе»».
03142, г. Киев, просп. Академика Вернадского, 34/1.