

М.І. Базалєєв, к.т.н.; В.В. Брюховецький, д.ф.-м.н.; В.Ф. Клепиков, член-кор. НАН України;
В.В. Литвиненко, д.т.н.; Є.М. Прохоренко, к.ф.-м.н., докторант (Інститут електрофізики і
радіаційних технологій НАН України) м. Харків, Україна

Термографічний контроль структурних неоднорідностей у ферромагнетиках при активації електромагнітним полем

В роботі розглянуто фізико-технічні основи термографічного контролю структури ферромагнітних матеріалів при активації електромагнітним полем. Показано, що при електромагнітній активації за рахунок перетворення частини електромагнітної енергії в тепло на неоднорідностях формуються температурні аномалії, що відображають внутрішню структуру об'єктів контролю. Приведено принципову схему і технічні характеристики розробленої експериментальної електрофізичної установки.

Ключові слова: термографічний контроль, електромагнітна активація, термопроявлення дефектних структур.

В работе рассмотрены физико-технические основы термографического контроля структуры ферромагнитных материалов при активации электромагнитным полем. Показано, что при электромагнитной активации благодаря превращению доли электромагнитной энергии в тепло на неоднородностях формируются температурные аномалии, которые отражают внутреннюю структуру объекта контроля. Приведено принципиальную схему и технические характеристики разработанной экспериментальной электрофизической установки.

Ключевые слова: термографический контроль, электромагнитная активация, термопроявление дефектных структур.

The paper discusses the physical and technological basis of thermographic control structure of ferromagnetic materials were activated by the electromagnetic field. It is shown that the electromagnetic activation due to the transformation of the proportion of electromagnetic energy into heat generated by inhomogeneities of temperature anomalies, which reflect the internal structure of an object of verification. The schematic diagram and specifications of the developed electrophysical facility were shown.

Keywords: thermography control, electromagnetic activation, thermal manifestation of defects structures.

Сучасне компресорне та енергетичне машинобудування потребує розробки нових та покращення існуючих технологій неруйнівної дефектоскопії, які забезпечують високі показники продуктивності, ефективності, якості і достовірності контролю. Активні термографічні методи неруйнівного контролю конструкційних матеріалів набувають поширення у зв'язку з можливістю вибіркового розігріву дефектних ділянок або зон порушення суцільності матеріалу і реєстрації їх термопроявлення тепловізійними засобами контролю [1]. Ефективність активних методів термографічного контролю у значній мірі залежить від вибору типу активуючої дії, енергетичний вплив від якої є найбільш чутливим до зміни теплофізичних та електрофізичних характеристик в зонах порушення суцільності матеріалу.

Основними напрямками удосконалення термографічних методів є підвищення температурної чутливості та часового розрізнення,

оптимізація обчислювальних процедур з одержаними термограмами та апробація різноманітних фізичних механізмів активації температурного поля навколо дефектної зони. Серед підходів до активації надлишкового тепловиділення в дефектній зоні з метою її подальшої реєстрації можна виділити підхід, що ґрунтується на впливі на досліджуваній об'єкт ультразвукових коливань з вибірковою нагріванням дефектних зон за рахунок того, що вони мають більше значення акустичного опору. Окреме місце займають методи, що засновані на зміні вихрових струмів і магнітних потоків, що збуджуються, на неоднорідностях у металі, під впливом яких за рахунок перетворення частини електромагнітної енергії в тепло формуються температурні аномалії, і принципи візуалізації температурних полів, що відображають внутрішню структуру (наявність дефектів) об'єктів контролю, стимульованих дією електромагнітних полів. Саме розробці такого методу присвячена дана робота.

Особливості термопроявлення структурних неоднорідностей в матеріалах при дії електромагнітних полів

Для вирішення важливої проблеми, пов'язаної з визначенням найбільш схильних до ушкоджень зон із граничним станом металу, може бути використано зв'язок електрофізичних властивостей металів на рівні кристалічних ґраток з механічними властивостями, пошкодженнями структури, пружними і пластичними деформаціями і т.д. [2]. 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 деформації металу під дією стискаючих і розтягуючих напружень, температури і т.д. може бути охарактеризована сукупністю електрофізичних параметрів, вели-

чини яких можуть бути виміряні та використані для виявлення і прогнозування в металевих конструкціях ділянок металу з неприпустимим значенням накопичених пошкоджень. Оскільки процеси деформації кристалічної структури, зародження і розвитку дефектів супроводжуються зміною електрофізичних властивостей металів [3, 4], доцільним стає активація металічних зразків 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 тепловізійної 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. Тривала 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 тепловізійної інфрачервоної (ІЧ) радіометрії є дуже 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 зміни структури сплаву за рахунок 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 кристалічної будови [5]. Доменна границя, у силу своєї унікальності, може служити чутливим індикатором, здатним реагувати на невеликі зміни в структурі речовини, викликані релаксаційними процесами [6]. 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 [2, 7]. У реальних доменах джерелами магнітної анізотропії є внутрішні напруження, форма кристалітів та 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 характеристик матеріалів з врахуванням дії зовнішніх чинників, які створюють хибні температурні аномалії при термографічному (теповізійному) контролі [1].

Перемагничування феромагнетика в змінних магнітних полях завжди супроводжується тепловими втратами енергії, які обумовлені втратами на гістерезис і динамічними втратами. Проведений аналіз [3, 4, 5, 7] показує, що існує зв'язок між параметрами магнітного гістерезису та параметрами структурних неоднорідностей феромагнітних сталей: розміром зерна, кількістю і розміром слабомагнітних і немагнітних включень, величиною і розподілом внутрішніх напружень та ін. У зв'язку з цим виникає питання про можливість рішення таких задач, як, наприклад, оцінка напружень у конструкційних сталях, виявлення ділянок пластичної деформації та ін.

Динамічні втрати, що пов'язані з вихровими струмами, індукованими в об'ємі матеріалу, залежать від електричного опору матеріалу, зменшуючись із ростом опору. 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, їхнє зменшення – знижує питомий електричний опір [8]. Питомий електричний опір феромагнетиків з високою точністю структурно чутливий до виникнення в них дефектів. При підвищенні щільності дислокацій ускладнюються процеси зсуву доменних стінок, збільшується індукція намагнічування. Джерелом магнітної анізотропії можуть бути внутрішні напруження, форма кристалітів і інші причини (наприклад, пластична деформація), які можуть бути виявлені при активації зразків змінним магнітним полем.

При пластичній деформації зі збільшенням її величини 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 підвищеної концентрації дислокацій. Через дисипацію електромагнітної енергії на структурних неоднорідностях (міжфазних і міжзеренних границях, зонах концентрації напружень, мікротріщинах і порах) формуються термоаномалії, які відображають 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 перемагничуванні і застосуванням нових теплофізичних ефектів, так і можливістю контролю сучасними тепловізійними ІЧ-радіометричними засобами термопроявлення внутрішніх структур і дефектів у тілах при їхній активації електромагнітним полем.

Електрофізична установка для контролю струк-

турних неоднорідностей у феромагнітних матеріалах за методом активної тепловізійної термографії

На рис. 1 представлена принципова схема експериментальної електрофізичної установки для контролю структурних неоднорідностей у феромагнітних матеріалах, активованих дією електромагнітного поля, за методом активної тепловізійної термографії. Основним конструкційним елементом установки є електромагнітний активатор (ЕМА), у якому за допомогою полюсів магнітопроводу (частина 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 $TP.1$, вихідна напруга U якого регулюється за допомогою автотрансформатора ЛАТР. Вихідні дані трансформатора $TP.1$: напруга $U=(3\div 6)$ В, струм $I=(100\div 500)$ А, максимальна

потужність 3,0 кВт. П-подібний сердечник (магнітопровід) ЕМА виготовлено з феромагнітного матеріалу (шихтовані пластини з електротехнічної сталі з високою магнітною проникністю); поперечний переріз складає 7×8 см²; відстань між полюсами магнітопроводу – 18 см; довжина полюсів – 18 см; маса магнітопроводу – 45 кг. Магніторухійна сила котушок ЕМА (при полюсах магнітопроводу, що закорочені феромагнітним сердечником) $1000\div 4000$ амперів-витків (регулюється способом підключення котушок L_1 і L_2 (перемикач Π) і величиною напруги U . Співвідношення активної і реактивної складових магнітних потоків у магнітопроводі регулюється активним опором R_H у електричному колі навантажувальної котушки L_3 . Обробка термозображень, одержаних 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, індуктує у матеріалі електрорушійну силу, під дією якої виникають електричні (вихрові) струми, що протікають по замкнутих контурах, розташованих у площинах, які перпендикулярні до 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, а 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 l , активна потужність, що перетворюється у тепло вихровими струмами, визначається як [7]:

$$P_F = \frac{4}{3} \gamma k_f^2 d^2 f^2 B_m^2 V = \xi f^2 B_m^2 V, \quad (1)$$

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 перетину зразка d ; f – частота змінного струму; B_m – амплітуда індукції (щільність магнітного потоку); $V=hl d$ (об'єм зразка). Формула справедлива за умови, коли $h \gg d$, при цьому втрати на вихрові струми залежать від товщини листа d , частоти змінного струму (як f^2) і амплітуди індукції B_m . Втрати P_H на перемагнічування зразка (гістерезисні втрати) можна визначити за формулою:

$$P_H = W_H' f = \eta f B_m^n, \quad (2)$$

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

Загальні втрати P_{FH} у зразку складаються із втрат на вихрові

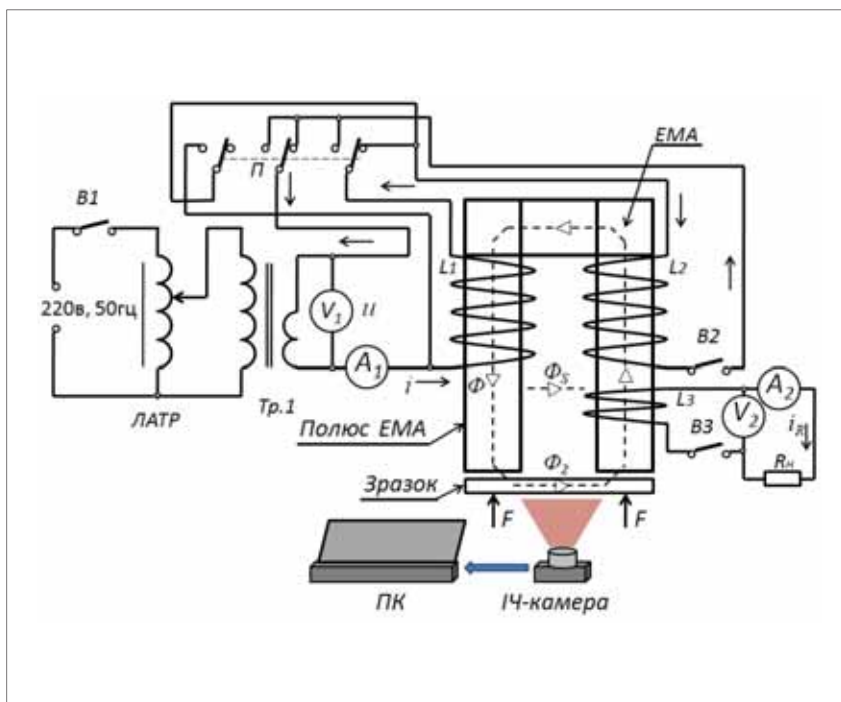


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки для термографічного контролю структури феромагнітних матеріалів при активації електромагнітним полем

струми і перемагнічування, тобто:

$$P_{FH} = P_F + P_H = (\eta f + \xi f^2) E_m^2 V. \quad (3)$$

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. 2-4. При закріпленні зразка до торців полюсів активатора із притискним зусиллям F (рис. 2), зразок знаходиться під впливом як електромагнітного поля, так і циклічних механічних напружень, які створюють полюси ЕМА за рахунок магнітострикційного ефекту (це визиває зміну лінійних розмірів магнітопроводу) і вібрації шихтового 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 і 4 показані варіанти розміщення і переміщення в робочій зоні ЕМА зразків з листового матеріалу (смуга) і труби відповідно.

Як приклад, на рис. 5 наведені термозображення і термограми одного з експериментів, що були проведені на експериментальній установці, які демонструють термопроявлення різних видів штучно створених дефектів у зразку з феромагнетика (пластина $80 \times 70 \times 2$ мм³, сталь Ст.30 з нанесеним лакофарбовим покриттям) при активації зразка в робочій зоні ЕМА (варіант рис. 3) без контакту з полюсами. Енергетичний режим роботи ЕМА не перевищував 50% максимальної потужності установки і не був оптимізований для рішення конкретної задачі. У якості ІЧ-камери використовувався тепловізор LIPS 814 (температурне розрізнення 0,08 К, спектральний діапазон ІЧ-випромінювання, що реєструється, 8-14 мкм).

Як видно з термограми 4 (рис. 5), при електромагнітній активації зразка перевищення амплітуди термоаномалій в області дефектів D_1 , D_2 і D_3 щодо фонові температури досягає значень 1,0°C, 0,2°C і 0,4°C відповідно в залежності від теплофізичних властивостей і розмірів штучно створених дефектів.

Висновки

1. Основу 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 теплоту.

2. 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.

3. Використання електромагнітної енергії для активації термопроявлення дефектів у тепловому полі істотно підвищує ефективність використання термографічного методу для виявлення дефектів на ранній

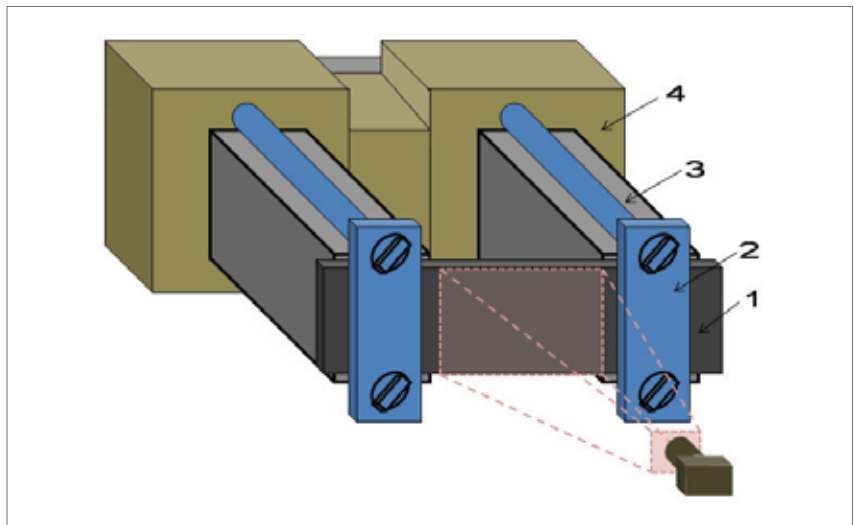


Рис. 2. Варіант закріплення зразка в робочій зоні ЕМА до торців полюсів активатора з притискним зусиллям F .
1 – зразок; 2 – притискний пристрій; 3 – полюс ЕМА; 4 – індукційна котушка

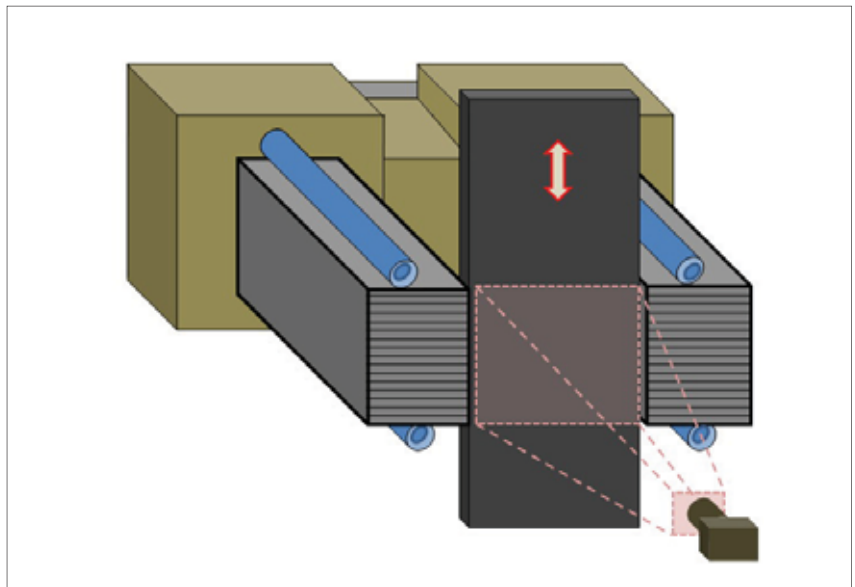


Рис. 3. Варіант розміщення і переміщення в робочій зоні ЕМА зразка з листового матеріалу

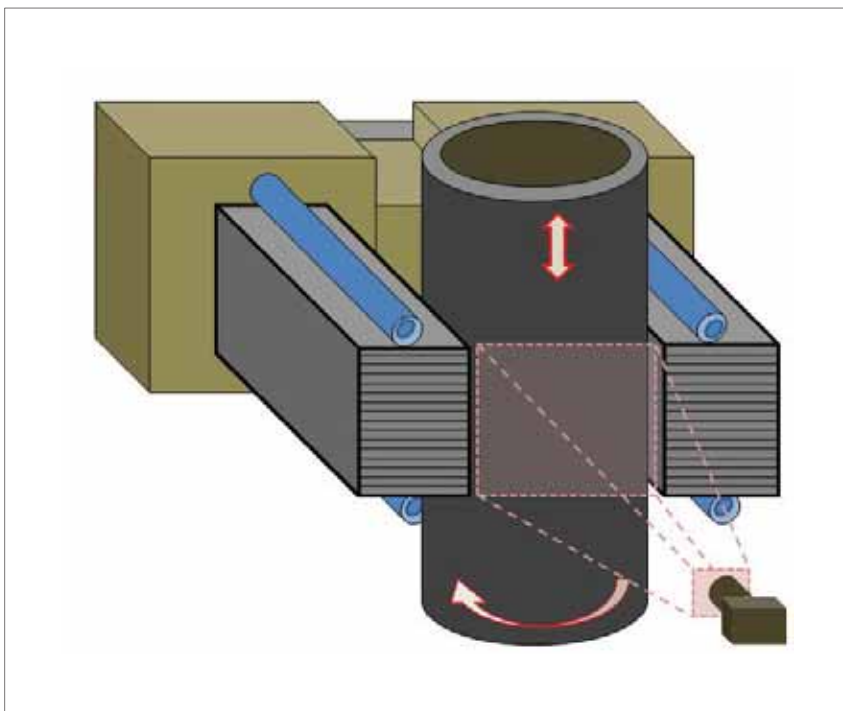


Рис. 4. Варіант розміщення і переміщення в робочій зоні ЕМА зразка з труби

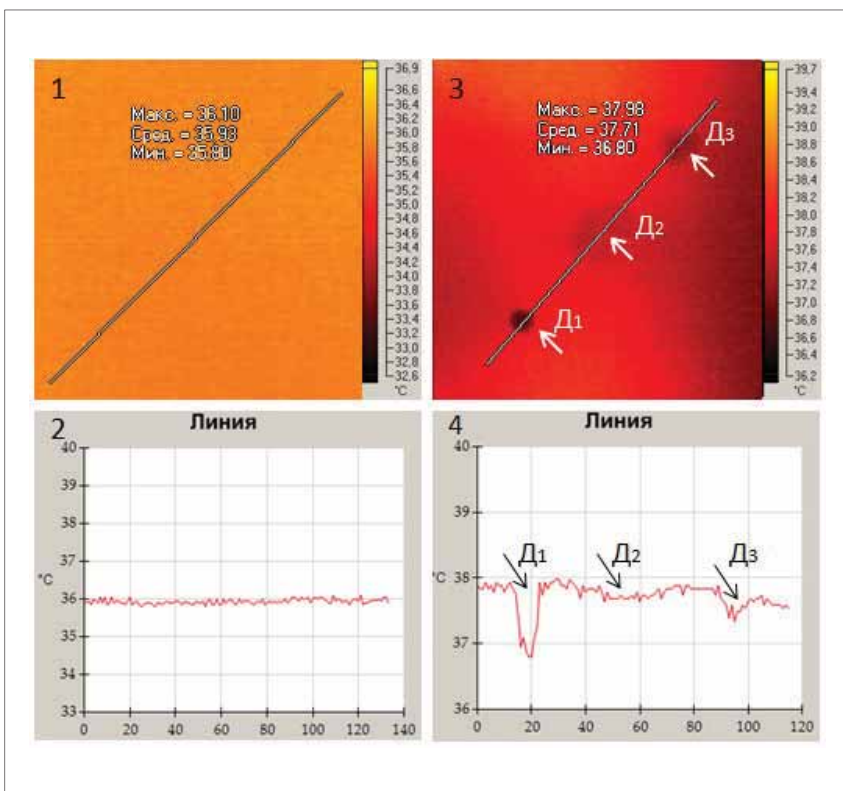


Рис. 5. Термопроявлення штучно створених дефектів у зразку з ферромагнетика (пластина $80 \times 70 \times 2$ мм³, сталь Ст.30) при активації в ЕМА. 1 і 2 – термоображення і термограма (уздовж лінії, що перетинає місце розташування дефектів) зразка до початку електромагнітної активації; 3 і 4 – термоображення і термограма (уздовж лінії, що перетинає місце розташування дефектів) зразка під час електромагнітної активації

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.

4. 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.

Список літератури:

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В.П. Вавилов. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.
2. 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. Hodowanyc // J. Mech. And Phys. Solids. – 2000. – №48. – P. 581-607.
3. De Lacheisserie, É. Magnetism: Fundamentals / É. De Lacheisserie, D. Gignoux M. Schlenker. - Springer, 2005. – V.1. – 507 p.
4. Maugin G. The Thermomechanics of Plasticity and Fracture / G. Maugin. - Cambridge: Cambridge University Press, 1992. – 350 p.
5. Hubert A. Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures / A. Hubert, R. Schäfer. – Springer, 1998. – 696 p.
6. Хуберт А. Теория доменных стенок в упорядоченных средах / А. Хуберт. – М.: Мир, 1977. – 306 с.
7. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения / С. Тикадзуми; пер. с япон. – М.: Мир, 1987. – 497 с.
8. Тимофеев И.А. Удельные потери в ферромагнетике / И.А. Тимофеев // Современные проблемы науки и образования. – 2007. – № 6 – С. 136-142.