



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

Дефектоскопия



Неразрушающий контроль

Техническая диагностика

Анализ материалов

№ 9

2024



НАУКА

— 1727 —

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 9
2024

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

- Е.Г. Базулин.** Восстановление изображения отражателей методом цифровой фокусировки апертуры в толстостенных трубах малого диаметра 3

Тепловые методы

- С.Е. Черных, В.П. Вавилов, В.Н. Костин, Ю.И. Комоликов, Д.Ю. Кладов.** Тепловой контроль корундовой керамики: импульсный нагрев и оптимизированные алгоритмы обработки данных 15

Электромагнитные методы

- А.Н. Мушников, А.М. Поволоцкая, С.М. Задворкин, К.Д. Крючева.** Влияние двухосного симметричного растяжения на магнитные свойства составного образца из двух стальных пластин с различными механическими и магнитными свойствами 25

Рентгеновские методы

- А.А. Комарский, С.Р. Корженевский, А.В. Пономарев, А.С. Чепусов, В.В. Криницин, О.Д. Красный.** Сравнение методов изменения спектра излучения импульсного рентгеновского источника для определения наиболее эффективной двухэнергетической обработки изображений 40

По материалам XXXV Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)»

- А.В. Кочнев, М.Б. Ригмант, М.К. Корх, Н.В. Гордеев, А.М. Матосян.** Мониторинг изменения относительной магнитной проницаемости при циклических испытаниях на изгиб образцов из аустенитной стали 10X18H10T 52

- А.М. Матосян, А.П. Ничипурук, А.Н. Сташков, Е.Ю. Сажина, Н.В. Гордеев, С.В. Афанасьев.** Особенности изменения магнитных свойств термообработанной стали 38ХС на начальной стадии холодной пластической деформации растяжением 57

- Л.В. Михайлов, А.В. Михайлов, Ю.Л. Гобов, А.В. Никитин, Я.Г. Смородинский, В.Н. Костин.** Оптимизация намагничивающих систем для дефектоскопов бурильных труб 62

- А.В. Никитин, Л.В. Михайлов, А.В. Михайлов, Ю.Л. Гобов, В.Н. Костин, Я.Г. Смородинский.** Восстановление формы дефекта ферромагнитной пластины путем решения обратной задачи магнитостатики и серии прямых задач 67

- А.В. Михайлов, Л.В. Михайлов, Н.Ю. Трякина, С.В. Трапезников, А.С. Саломатин, С.С. Кукушкин, Я.Г. Смородинский, В.Н. Костин, О.Н. Василенко.** Анализ механизма образования дефектов газопровода в результате воздействия дугового разряда на стенку трубы 73

- Информация** 78

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ФОКУСИРОВКИ АПЕРТУРЫ В ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБАХ МАЛОГО ДИАМЕТРА

© 2024 г. Е.Г. Базулин^{1,*}

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»,
Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»
E-mail: *bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 27.06.2024; после доработки 30.07.2024
Принята к публикации 02.08.2024

При проведении ультразвукового контроля труб различного диаметра с использованием антенных решеток и матриц широко используются две технологии восстановления изображения отражателей: технология фокусировки антенной решеткой (ФАР) и технология цифровой фокусировки апертуры (ЦФА). Если диаметр трубы больше сотни длин волн, при восстановлении изображения отражателей можно воспользоваться методом ЦФА с учетом нескольких отражений от границ, полагая, что объект контроля плоский. Ошибки при формировании ЦФА-изображения отражателей в этом случае будут незначительные. Но если диаметр трубы несколько десятков длин волн, а толщина стенки составляет порядка половины диаметра трубы, то в этом случае для получения качественного ЦФА-изображения отражателей нужно обязательно учитывать геометрию объекта контроля. В статье рассмотрены особенности формирования изображения при регистрации эхосигналов антенной решеткой или матрицей при сканировании как по внешней, так и по внутренней поверхности объекта контроля. В численном и модельном экспериментах показано, что для получения высококачественного ЦФА-изображения отражателей при сканировании по внешней поверхности толстостенной трубы малого диаметра можно использовать как антенную решетку, так антенную матрицу. Это связано с наличием эффекта физической фокусировки ультразвукового поля. Но при сканировании по внутренней поверхности толстостенной трубы малого диаметра из-за эффекта расфокусировки для восстановления изображения отражателей регистрировать эхосигналы надо антенной матрицей.

Ключевые слова: антенная решетка, Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), цифровая фокусировка апертуры (ЦФА), антенная матрица, когерентный фактор (CF).

IMAGE RESTORATION OF REFLECTORS BY THE METHOD OF DIGITAL APERTURE FOCUSING IN THICK-WALLED PIPES OF SMALL DIAMETER

© 2024 E.G. Bazulin^{1,*}

¹Scientific and Production Center ECHO+ LLC,
Russia 123458 Moscow, Tvardovsky str., 8, Strogino Technopark
E-mail: *bazulin@echoplus.ru

In ultrasonic inspection of pipes of various diameters using antenna arrays and arrays, two technologies of reflector image reconstruction are widely used: antenna array focusing technology (PAUT) and digital aperture focusing (DAF) technology. If the tube diameter is larger than a hundred wavelengths, the DAF method can be used to reconstruct the reflector image by taking into account several reflections from the boundaries, assuming that the object of inspection is flat. In this case, the errors in the formation of DAF-image of reflectors will be insignificant. However, if the pipe diameter is several tens of wavelengths and the wall thickness is about half of the pipe diameter, then in this case the geometry of the inspection object must be taken into account to obtain a high-quality DAF-image of the reflectors. The paper considers the peculiarities of image formation at registration of echo signals by an antenna array or matrix, when scanning both on the external and internal surfaces of the object of control. In numerical and modeling experiments it is shown that both antenna array and antenna array can be used to obtain high-quality DAF-image of reflectors when scanning along the outer surface of a thick-walled pipe of small diameter. This is due to the presence of the effect of physical focusing of the ultrasonic field. But when scanning along the inner surface of a thick-walled tube of small diameter, because of the defocusing effect, it is necessary to register echoes with an antenna array to restore the image of reflectors.

Keywords: antenna array, Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), digital aperture focusing (DAF), antenna array, coherence factor (CF).

DOI: 10.31857/S0130308224090018

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при проведении ультразвукового контроля с применением пьезоэлектрических антенных решеток широко используются две технологии восстановления изображения отражателей: технология фокусировки антенной решеткой (ФАР) [1] и технология цифровой фокусировки апертуры (ЦФА) [2]. В работе [3] обе технологии сравниваются, и делается вывод

о том, что ЦФА-технология более перспективна в плане применения разнообразных алгоритмов восстановления изображения отражателей. Метод ЦФА позволяет восстановить изображения отражателей со сплошной фокусировкой во всех точках области восстановления изображения (ОВИ). На первом этапе регистрируются эхосигналы для всех комбинаций излучатель—приемник элементов антенной решетки (режим Full Matrix Capture [4]). На втором этапе по измеренным эхосигналам методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [5, 6] восстанавливается изображение отражателей с учетом эффекта трансформации типа волны при многократном отражении импульсов от границ объекта контроля. Метод C-SAFT в зарубежной литературе, посвященной ультразвуковому контролю, называется Total Focusing Method (TFM) [7]. Линейную (одномерную) фазированную решетку, согласно ISO 23865:2021 [4], в статье будем называть антенной решеткой, а 2D-фазированную решетку с элементами, расположенными в узлах прямоугольной сетки, будем называть антенной матрицей.

Для повышения качества изображения, уменьшения уровня шума и повышения разрешающей способности метод ЦФА можно использовать совместно с расчетом когерентного фактора (Coherence Factor (CF)) [8, 9]. В зарубежной литературе используется термин Phase Coherence Imaging (PCI) [10].

Если диаметр трубы больше сотни длин волн, то при восстановлении изображения отражателей можно воспользоваться методом ЦФА с учетом нескольких отражений от границ, полагая, что объект контроля плоский [11—13]. Ошибки при формировании ЦФА-изображения отражателей в этом случае будут незначительные. Но если диаметр трубы несколько десятков длин волн, а толщина стенки составляет порядка половины диаметра трубы, то в этом случае для получения качественного ЦФА-изображения отражателей нужно обязательно учитывать геометрию объекта контроля при размещении антенной решетки или матрицы как снаружи, так и внутри объекта контроля. Малые значения радиусов внешней и внутренней поверхностей объекта контроля приводят к физической фокусировке и расфокусировке ультразвукового поля.

Целью данного исследования являлось изучение возможности получения высококачественного изображения отражателей методом ЦФА при использовании для регистрации эхосигналов антенной матрицы или решетки, сканирующей как по внешней, так и по внутренней поверхности толстостенной трубы малого диаметра.

2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В ТОЛСТОСТЕННОЙ ТРУБЕ МАЛОГО ДИАМЕТРА МЕТОДОМ TFM

2.1. Особенности проведения контроля с внешней или внутренней стороны трубы

На рис. 1а схематически показан фрагмент толстостенной трубы с установленной на ее внешнюю поверхность антенной решеткой с притертой призмой. Внешний диаметр трубы равен r_{out} , а внутренний — r_{in} . Положение призмы в плоскости xz определяется координатой x_w вдоль оси x_s , совпадающей с поверхностью трубы. Элементы антенной решетки и ось u расположены перпендикулярно плоскости рисунка. При такой ориентации антенной решетки изображение отражателей в плоскости xz в ОВИ, отмеченной на рис. 1а прямоугольником с пунктирной границей красного цвета, будет формироваться как при работе с обычным одноэлементным пьезопреобразователем, сканирующим вдоль окружности по оси x_s , без учета специфики антенной решетки. По эхосигналам, измеренным в разных точках по оси x_s , с помощью метода TFM можно сформировать изображение отражателей. При этом возникнет два эффекта. Во-первых, из-за выпуклой цилиндрической поверхности возникнет эффект фокусировки, эхосигналы будут регистрироваться на апертуре размерами около четверти длины окружности, которая схематически показана на рис. 1а утолщенной линией красного цвета. Во-вторых, отражатели будут находиться в ближней зоне одного элемента антенной решетки, и это приведет к повышенному влиянию краевых волн [14, 15]. На рис. 1а путь распространения краевого импульса от левого края элемента антенной решетки показан двумя пунктирными стрелками зеленого цвета. На рис. 1 поле элемента антенной решетки и матрицы схематически показаны многоугольником с зеленой полупрозрачной заливкой. Отражатель будет находиться в ближней зоне поля элемента антенной решетки, а дальнейшее поле элемента антенной матрицы может сформироваться уже в притертой призме, как показано на рис. 1б.

Если использовать антенную матрицу скажем с четырьмя элементами в плоскости xz (см. рис. 1б), то даже в одном положении матрицы x_w можно будет получить сфокусированную индикацию отражателя на ЦФА-изображении, так как для фокусировки будут использоваться четыре элемента матрицы. На рис. 1б сплошными стрелками зеленого цвета показаны две лучевых траектории для первого и третьего элемента. Уменьшение размеров элемента матрицы в несколько раз приводит к увеличению ширины диаграммы направленности, поэто-

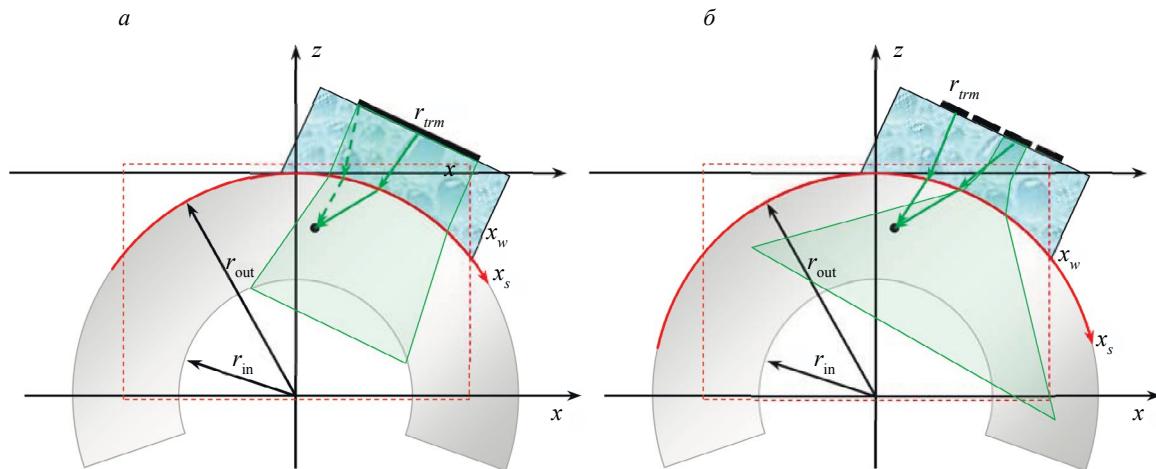


Рис. 1. К расчету траекторий в толстостенной трубе малого диаметра.

му пространственная апертура, на которой элементом будет «виден» отражатель, увеличится, что приведет к росту поперечной разрешающей способности ЦФА-изображения. На рис. 1б активная апертура при сканировании антенной матрицей схематически показана утолщенной линией красного цвета.

При размещении антенной решетки или матрицы внутри трубы высказанные соображения сохраняют свою силу. Однако на вогнутой поверхности из-за эффекта расфокусировки активная апертура уменьшится при сканировании вдоль оси x_s . Поэтому разрешающая способность ЦФА-изображения будет хуже, чем в случае сканирования по внешней поверхности трубы.

2.2. Метод ЦФА с учетом когерентного фактора

На первом этапе процесса восстановления изображения отражателей регистрируются эхосигналы для всех комбинаций излучатель—приемник элементов антенной решетки или матрицы (режим FMC). Набор эхосигналов при излучении одним элементом матрицы и регистрацией всеми элементами называется выстрелом. Набор эхосигналов, состоящий из всех выстрелов, будем называть залпом. На втором этапе по измеренным эхосигналам изображение отражателей восстанавливается методом TFM по заданной акустической схеме, которую будем обозначать как as . Под акустической схемой будем подразумевать описание лучевой траектории распространения импульса от излучателя до отражателя и до приемника при отражении импульса от неровных границ объекта контроля. Акустическая схема будет определяться последовательностью букв L (продольная волна), T (вертикально поляризованная поперечная волна) и буквы d (отражение от несплошности). Например, запись TTdTT означает работу с поперечной волной с одним отражением от дна при излучении и приеме.

Пусть антенная решетка или матрица находится в точке $\mathbf{r}_w$ (см. рис. 1) и регистрация эхосигналов $p(\mathbf{r}_{t,m}, \mathbf{r}_{r,n}, t)$ проводится в режиме FMC, где m и n — номера излучающего и принимающего элемента. Перед восстановлением изображения обычно измеренные эхосигналы переводят в комплексный вид с помощью преобразования Гильберта. Обозначим через $I_m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$ комплексное изображение, восстановленное в точках $\mathbf{r}_i$ ОВИ по выстрелу номер m , то есть по эхосигналам, измеренным всеми элементами АР при излучении элементом номер m . Тогда обычное ЦФА-изображение можно получить, сложив когерентно все изображения по выстрелам:

$$I_s(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) = \sum_{m=1}^{N_e} I_m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w), \quad (1)$$

где N_e — число элементов антенной решетки или матрицы, а парциальное повывстрельное изображение рассчитывается по формуле:

$$I_m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) = \sum_{n=1}^{N_e} p(\mathbf{r}_{t,m}, \mathbf{r}_{r,n}, t - t_{\text{del}}(\mathbf{r}_{t,m}, \mathbf{r}_{r,n}, \mathbf{r}_i; as) + t_{\text{max}}), \quad (2)$$

где $t_{\text{del}}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_p, as)$ — время пробега импульса от излучателя $\mathbf{r}_i$ до точки $\mathbf{r}_i$ и к приемнику $\mathbf{r}_r$ для заданной акустической схемы as ; t_{max} — время нарастания импульса.

Но объединить парциальные повывстрельные изображения $I_m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$ можно и иными способами. Например, можно рассчитать когерентный фактор [16, 9] для каждой точки $\mathbf{r}_i$ набора по набору повывстрельных изображений:

$$I_{CF}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) = CF(I_m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)), \quad (3)$$

а в качестве восстановленного изображения рассматривать функцию:

$$I(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) = I_S(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) \cdot I_{CF}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w). \quad (4)$$

Такое представление результатов контроля возможно из-за важного свойства когерентного фактора, которое заключается в том, что при отсутствии шума амплитуды $I_{CF}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$ индикаций отражателей разной силы близки к единице. Поэтому амплитуды индикаций изображения, полученные по формуле (1) или (4), будут примерно одинаковы. Такой подход позволяет увеличить отношение сигнал/шум и разрешающую способность изображения отражателей.

В режиме сканирования антенной решетки или матрицы вдоль оси x_s итоговое изображение можно получить по формулам (1) или (4), но в качестве парциальных изображений будут использоваться N_p изображений $I_S(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$ или $I_{CF}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$, восстановленных для каждого положения антенной решетки или матрицы:

$$I(\mathbf{r}_i; as) = \sum_{p=1}^{N_p} I(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_{w,p}). \quad (5)$$

По этой же формуле можно получить изображение отражателей и при дополнительном сканировании по оси y .

2.3. Расчет времени пробега импульса с использованием принципа Ферма

В методе ЦФА ключевым моментом является расчет времени пробега импульса $t_{\text{del}}(\mathbf{r}_{\text{irm}}, \mathbf{r}_i; as)$ от центра элемента антенной решетки $\mathbf{r}_{\text{irm}}$ до точки ОВИ $\mathbf{r}_i$ по заданной акустической схеме as (см. рис. 1б). Для этого можно воспользоваться различными методами построения траекторий луча. Широко развиты методы построения лучевых трубок [17, 18], в том числе для неоднородных анизотропных сред [19, 20]. Но для такого простого случая, как расчет траектории при многократном отражении от границ однородного изотропного цилиндрического объекта, можно воспользоваться вариационным принципом Ферма [21], который гласит, что импульс распространяется по траектории с минимальным временем пробега.

Пусть излучение происходит из точки $\mathbf{r}_{\text{irm}} = (r_1, \varphi_1, y_1)$, координаты которой задаются в полярных координатах, а координаты точки ОВИ после отражений N_R равны $\mathbf{r}_i = (r_{NR+2}, \varphi_{NR+2}, y_{NR+2})$ (рис. 2). Траектория луча описывается $N_R + 2$ точками и состоит из $N_R + 1$ прямых, скорость распространения звука на которых задана списком $\{c\} = \{c_{w,p}, \{c_{obj}\}\}$, где $c_1 = c_{w,l}$ — скорость продольной волны в призме, а $\{c_{obj}\}$ — список, состоящий из произвольной последовательности скоростей продольной или поперечной волны в объекте контроля. У четных точек траектории первая координата приравнивается r_{in} , а у нечетных точек — r_{out} .

Время пробега импульса вдоль траектории, заданной в полярных координатах, можно рассчитать по формуле:

$$t_{\text{del}}(\mathbf{r}_{\text{irm}}, \mathbf{r}_i; as) = \sum_{n=1}^{N_R-1} \frac{r_n}{c_n}, \quad \text{где } r_n = \sqrt{r_n^2 + r_{n+1}^2 + 2r_n r_{n+1} \cos(\varphi_n - \varphi_{n+1}) + (y_n - y_{n+1})^2}. \quad (6)$$

Найти неизвестные наборы координаты пересечения траектории распространения импульса стенок объекта контроля $\{\{\varphi\}, \{y\}\} = \{\{\varphi_2, \dots, \varphi_{NR-1}\}, \{y_2, \dots, y_{NR-1}\}\}$ можно, решив задачу оптимизации:

$$\{\{\varphi\}, \{y\}\} = \arg \min_{\{\{\varphi\}, \{y\}\} \in \mathbb{R}^{N_R-2}} t_{\text{del}}(\mathbf{r}_{\text{irm}}, \mathbf{r}_i; as). \quad (7)$$

Для повышения скорости сходимости для решения задачи минимизации методами первого порядка нужно задать градиент функции $t_{\text{del}}(\mathbf{r}_{\text{irm}}, \mathbf{r}_i; as)$ по формулам:

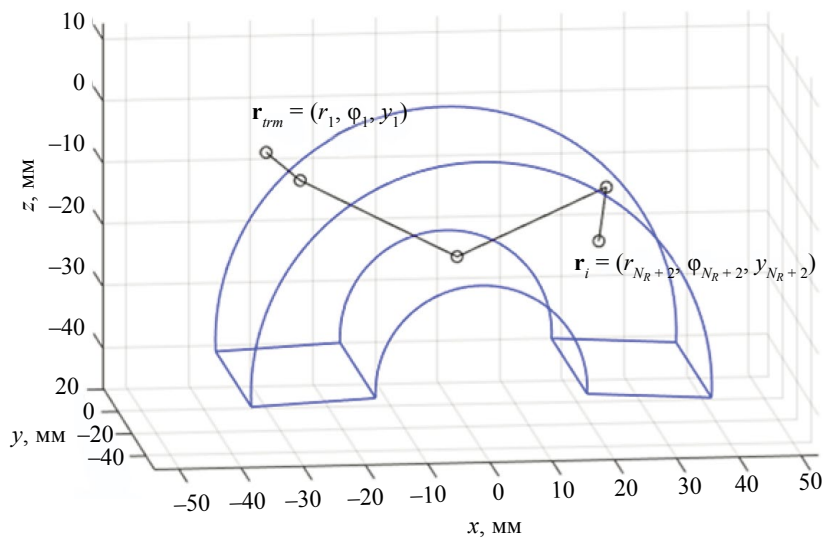


Рис. 2. К расчету траектории при двукратном отражении от границ стенок трубы (точка $\mathbf{r}_i$ находится ближе к читателю, чем точка $\mathbf{r}_{trm}$).

$$\frac{\partial t_{del}(\mathbf{r}_{trm}, \mathbf{r}_i; as)}{\partial \varphi_n} = -\frac{r_n r_{n+1} \sin(\varphi_n - \varphi_{n+1})}{r_n c_n} + \frac{r_{n+1} r_{n+2} \sin(\varphi_{n+1} - \varphi_{n+2})}{r_{n+1} c_{n+1}},$$

$$\frac{\partial t_{del}(\mathbf{r}_{trm}, \mathbf{r}_i; as)}{\partial y_n} = -\frac{(y_n - y_{n+1})}{r_n c_n} - \frac{(y_{n+1} - y_{n+2})}{r_{n+1} c_{n+1}}. \quad (8)$$

На рис. 2 показан пример расчета траектории при двукратном отражении луча от границ объекта контроля ($N_R = 3$) для профиля скорости $\{c\} = \{2,33; 5,9; 5,9; 5,9\}$ мм/мкс. Время пробега по траектории при приеме рассчитывается аналогичным образом, только задаются координаты центра элемента антенной решетки при приеме. Понятно, что акустическая схема на прием as_{rcv} может отличаться от акустической схемы при излучении as_{trm} . Для цилиндрических объектов контроля одинаковой толщины или объектов контроля с плоскопараллельными границами акустическая схема определяется списком скоростей, то есть можно полагать, что $as = \{as_{trm}, as_{rcv}\} = \{\{c\}_{trm}, \{c\}_{rcv}\}$. Комбинация рассчитанных времен пробега при излучении и приеме позволяет определить все варианты суммарных задержек для восстановления изображения отражателей методом TFM независимо от того, использовалась ли антенная решетка или антенная матрица.

3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения численных экспериментов использовались эхосигналы, рассчитанные с помощью теории лучевых трубок программой CIVA [22]. Объект контроля представлял собой трубу с внешним диаметром, равным 35 мм, и внутренним диаметром, равным 15 мм, то есть толщина стенки равна 20 мм. Эхосигналы рассчитывались от сферы радиусом 0,25 мм, расположенной в точке с полярными координатами, равными (32 мм, 0 град, 0 мм).

3.1. Сканирование по внешней поверхности трубы

3.1.1. Антенная решетка 16 элементов

Эхосигналы рассчитывались для антенной решетки с частотой 5 МГц, состоящей из 16 элементов размерами $0,75 \times 5$ мм с зазором 0,25 мм, установленной на рексолитовую призму с углом наклона 35 град. Антенная решетка располагалась снаружи трубы, была ориентирована вдоль оси y и для повышения разрешающей способности в плоскости xz перемещалась по поверхности цилиндра (ось φ) 21 раз с шагом 2 град, начиная с -20 град (см. рис. 1а). По оси y антенная решетка перемещалась 6 раз с шагом 5 мм, начиная с положения -25 мм. На рис. 3 показаны ЦФА-изображения сферы, восстановленные по формулам (2) и (5) по акустическим

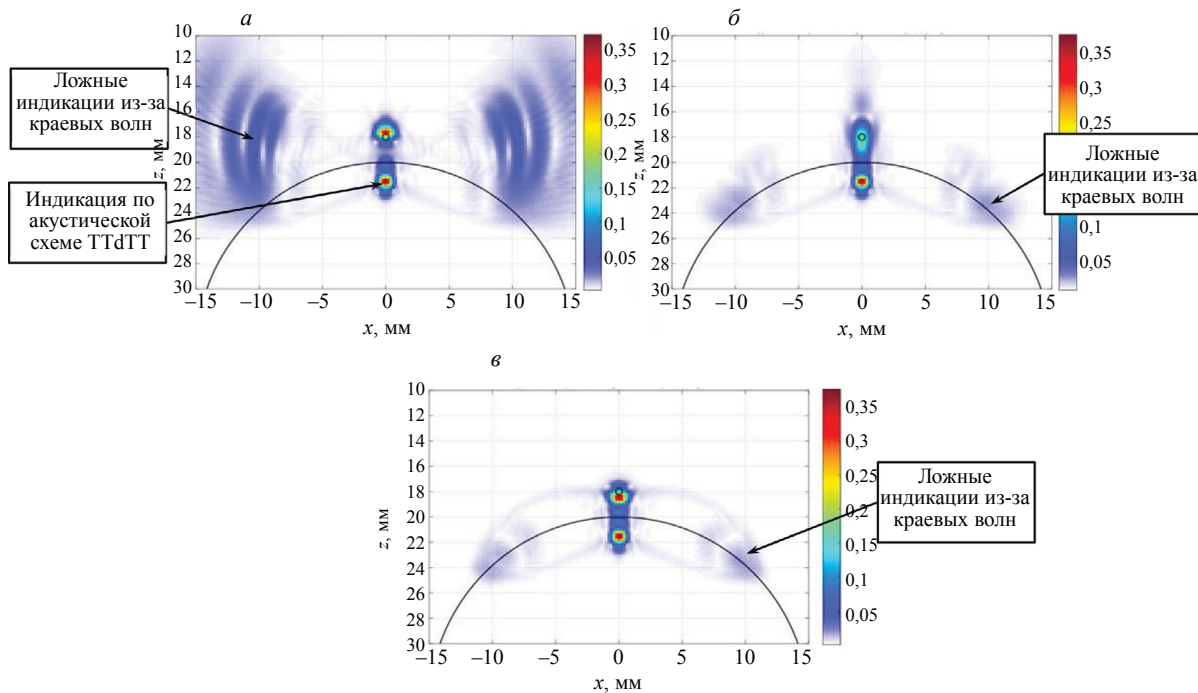


Рис. 3. ЦФА-изображения сферы, восстановленные по акустическим схемам, при использовании антенной решетки: TdT (a); TdTТ (б); TdTТТ (в).

схемам: TdT (a), TdTТ (б), TdTТТ (в). Оси на этих изображениях совпадают с показанными на рис. 1, а линией черного цвета показан внутренний диаметр трубы. На рис. 3a ложные индикации из-за наличия краевых волн имеют заметную амплитуду порядка -16 дБ от максимальной амплитуды индикации сферы. На изображениях, восстановленных на акустических схемах TdTТ и TdTТТ, ложные индикации из-за наличия краевых волн так же хорошо заметны. Из-за эффекта фокусировки разрешающая способность вдоль оси x достаточно высокая и равна примерно $1,5$ мм. Отметим, что на плоскопараллельном объекте разрешающая способность ЦФА-изображения вдоль оси x была бы около 5 мм, что примерно соответствует размеру пьезопластины. Если бы расчеты проводились для типовых антенных решеток с размером элемента равным $0,75 \times 10$ мм, то разрешающая способность была бы около 10 мм. Изображения вне границ образца можно не восстанавливать, тогда не будет ложной индикации, сформированной эхосигналами по акустической схеме TdTТТ.

3.1.2. Антенная матрица 16 на 4 элемента

Эхосигналы рассчитывались для антенной матрицы с частотой 5 МГц, состоящей из 16×4 элементов размерами $0,75 \times 1,25$ мм с зазором $0,25$ мм по обеим осям, установленной на рексолитовую призму с углом наклона 35 град. Апертура антенной матрицы была примерно равна апертуре антенной решетки, описанной в разделе 3.1.1. Антенная матрица располагалась снаружи трубы, была ориентирована вдоль оси y и для повышения разрешающей способности перемещалась по поверхности цилиндра (ось ϕ) 5 раз с шагом 10 град, начиная с -20 град. По оси y антенная матрица перемещалась 6 раз с шагом 5 мм, начиная с положения -25 мм. Апертура сканирования была примерно такая же, что и в разделе 3.1.1. На рис. 4 показаны ЦФА-изображения сферы, восстановленные по формулам (2) и (5) по акустическим схемам: TdT (a), TdTТ (б), TdTТТ (в). Оси на этих изображениях совпадают с показанными на рис. 1, а линией черного цвета показан внутренний диаметр трубы. На рис. 4a ложные индикации из-за наличия краевых волн исчезли, но стали заметны индикации из-за грубого шага антенной решетки. Эти индикации имеют амплитуду порядка -22 дБ от амплитуды индикации сферы. По сравнению с изображением на рис. 3, изображения, полученные с использованием антенной матрицы (см. рис. 4), имеют очень высокую разрешающую способность вдоль оси x , равную примерно $0,7$ мм, а уровень ложных индикаций из-за наличия краевых волн практически равен нулю.

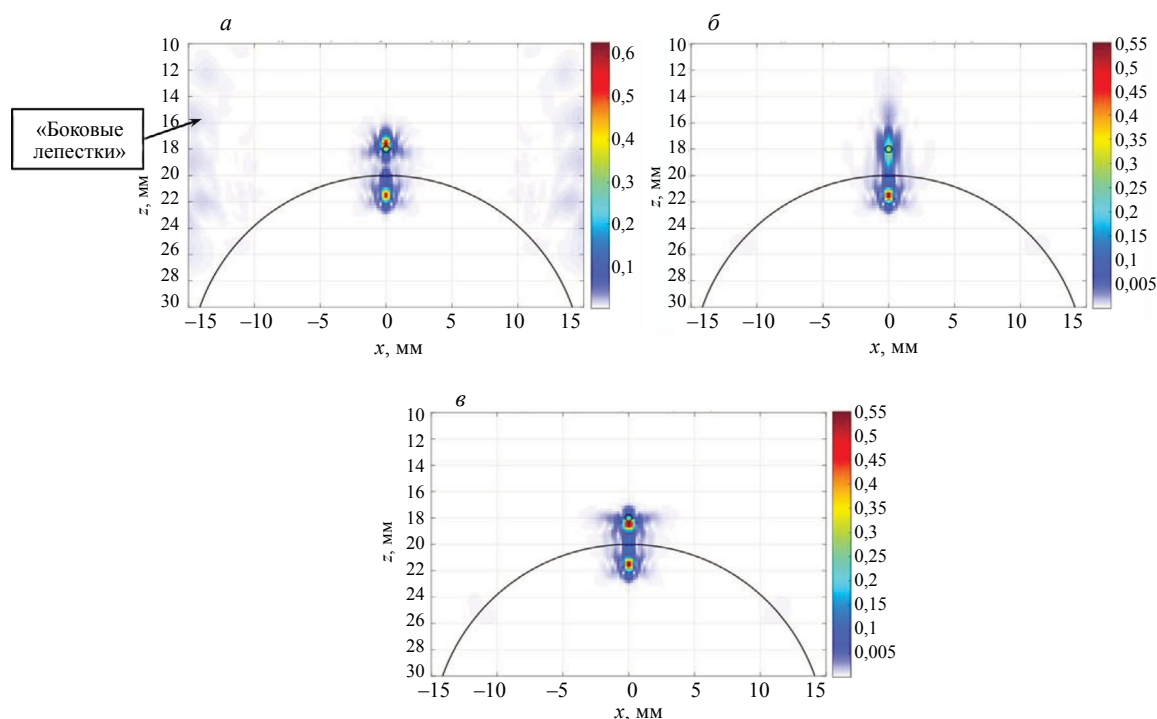


Рис. 4. Изображения сферы, восстановленные по акустическим схемам, при использовании антенной матрицы: TdT (*a*); TdTT (*б*); TTdTT (*в*).

3.2. Сканирование по внутренней поверхности трубы

3.2.1. Антенная решетка 16 элементов

Эхосигналы рассчитывались для антенной решетки с частотой 5 МГц, состоящей из 16 элементов размерами $0,75 \times 5$ мм с зазором 0,25 мм, установленной на рексолитовую призму с углом наклона 35 град. Антенная решетка располагалась внутри трубы на вогнутой поверхности, была ориентирована вдоль оси y и для повышения разрешающей способности растровым образом перемещалась по поверхности цилиндра (ось ϕ) 21 раз с шагом 2 град, начиная с -20 град. По оси z антенная решетка перемещалась 6 раз с шагом 5 мм, начиная с положения с -25 мм. На рис. 5*a* показано ЦФА-изображение сферы, восстановленное по формулам (2) и (5) по акустической схеме TdT, а на рис. 5*б* показано ЦФА-CF-изображение с учетом когерентного фактора, восстановленное по формулам (4) и (5). Оси на этих изображениях совпадают с показанными на рис. 1. В отличие от изображения на рис. 3*a*, из-за отсутствия эффекта фокусировки фронтальное разрешение даже ЦФА-CF-изображения на рис. 5*б* ухудшилось примерно в десять раз и равно 15 мм.

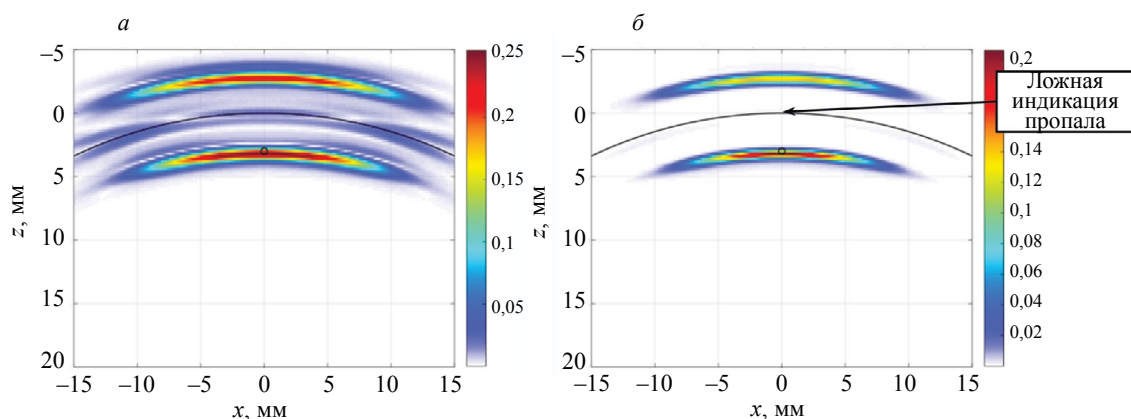


Рис. 5. ЦФА-изображение сферы при использовании антенной решетки по акустической схеме TdT (*a*); ЦФА-CF-изображение с учетом когерентного фактора (*б*).

3.2.2. Антенная матрица 16 на 4 элемента

Эхосигналы рассчитывались для антенной матрицы с частотой 5 МГц, состоящей из 16×4 элементов размерами $0,75 \times 1,25$ мм с зазором 0,25 мм по обеим осям, установленной на рексолитовую призму с углом наклона 35 град. Апертура антенной матрицы была примерно равна апертуре антенной решетки, описанной в разделе 3.2.1. Антенная матрица располагалась внутри трубы на вогнутой поверхности, была ориентирована вдоль оси y и для повышения разрешающей способности растровым образом перемещалась по поверхности цилиндра (ось ϕ) 5 раз с шагом 10 град, начиная с -20 град. По оси y антенная матрица перемещалась 6 раз с шагом 5 мм, начиная с положения с -25 мм. Апертура сканирования была примерно такая же, что и в разделе 3.2.1. На рис. 6а показано ЦФА-изображение сферы, восстановленное по формулам (2) и (5) по акустической схеме TdT, а на рис. 6б показано ЦФА-CF-изображение с учетом когерентного фактора, восстановленное по формулам (4) и (5). Оси на этих изображениях совпадают с показанными на рис. 1. В отличие от изображений на рис. 5, фронтальная разрешающая способность возросла примерно раз в пять раз и равна 3 мм, но из-за эффекта расфокусировки на вогнутой поверхности по сравнению с изображением на рис. 4а она хуже примерно в четыре раза.

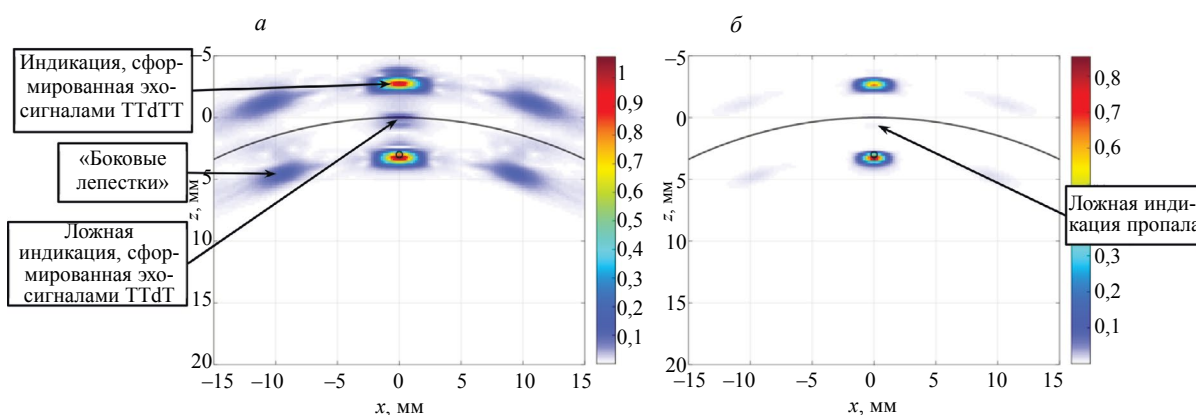


Рис. 6. ЦФА-изображение сферы при использовании антенной матрицы по акустической схеме TdT (а); ЦФА-CF-изображение с учетом когерентного фактора (б).

4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводились с использованием дефектоскопа «АВГУР АРТ», разработанного и изготавливаемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [23].

4.1. Объект контроля

В практике ультразвукового неразрушающего контроля встречаются объекты в виде протяженных труб малого радиуса 29 мм и толщиной стенки 20 мм. Причем на внешней поверхности трубы может быть сделана проточка с конусом и ступенькой, разделенными цилиндрической проточкой длиной около 20 мм и толщиной около 12 мм. При изготовлении и эксплуатации такого объекта на границе ступеньки и конуса с цилиндрической проточкой могут возникать трещины. Их можно достаточно просто обнаружить при контроле на прямом луче изнутри трубы. Однако при длине трубы в несколько метров система доставки и сканирования антенной решеткой на призме будет достаточно сложная. Несколько усложняет задачу изготовление специальных призм и антенных решеток или матриц, которые должны поместиться в достаточно узкую трубу диаметром 18 мм. При контроле снаружи нет необходимости изготавливать специализированные антенные решетки или матрицы, а конструирование систем сканирования для труб диаметром около 60 мм достаточно проработанная тема. Для повышения достоверности контроля целесообразно размещать одну призму со стороны ступеньки, а вторую призму со стороны конуса внешней проточки. Однако при контроле снаружи на прямом луче на фоне индикаций больших амплитуд от конуса индикацию трещины можно пропустить. Но, если использовать сканирующую антенную матрицу, то можно надеяться, что на ЦФА- или на ЦФА-CF-изображении по акустической схеме TdTT удастся уверенно обнаружить корень трещины.

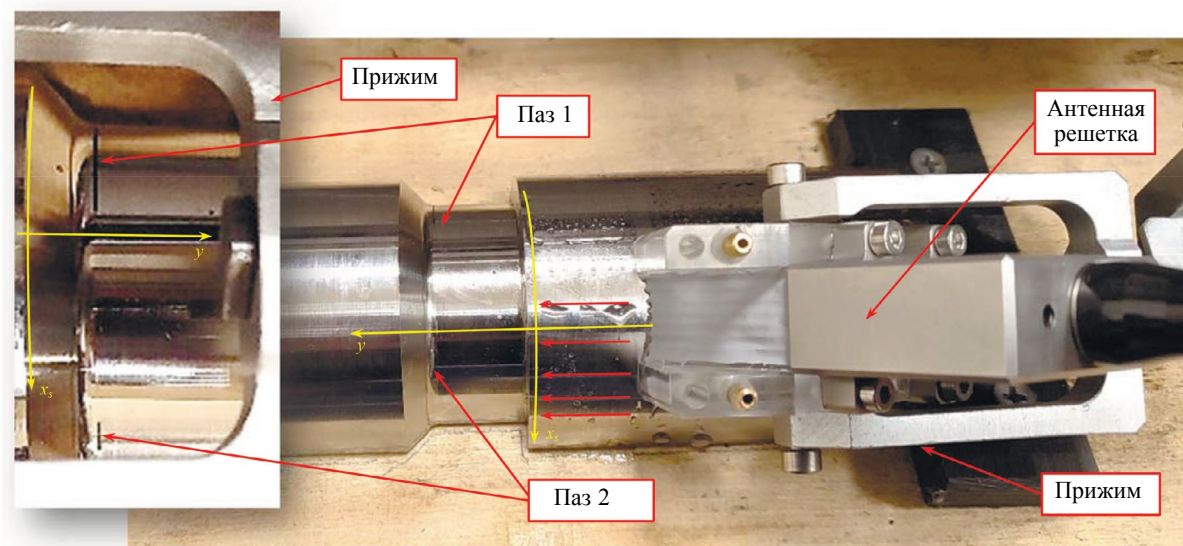


Рис. 7. Фотография толстостенной трубы, антенной решетки на призме, зажатой в прижим и расположенной со стороны ступеньки.

На рис. 7 показана фотография упомянутого выше фрагмента толстостенной трубы, антенной решетки на призме со стороны ступеньки, установленной в прижим системы сканирования, которая перемещает призму вдоль оси y и вдоль оси x_s . В образце электроэрозионным способом было изготовлено два паза в области пересечения конуса и цилиндрической проточки. Пазы отмечены на рис. 7 выносками. Паз 1 имел длину 15 мм, ширину 0,5 мм и глубину 5 мм, а паз 2 был длиной 2 мм, шириной 0,2 мм, высотой 2 мм (см. увеличенную врезку на рис. 7, полученную при другом освещении и при размещении матрицы со стороны конуса). Как показали модельные эксперименты, обнаружение паза 1 оказалось достаточно простой задачей, поэтому внимание было сосредоточено на получении изображения паза 2. Для регистрации эхосигналов использовалась антенная матрица с частотой 5 МГц, состоящей из 16×8 элементов размерами $0,75 \times 1,25$ мм с зазором 0,25 мм по обеим осям, установленная на рексолитовую призму с углом наклона 35 град.

4.2. Паз 2 со стороны ступеньки

На рис. 8а показано ЦФА-изображение паза при размещении антенной матрицы со стороны ступеньки, как показано на рис. 7, восстановленное по формулам (2) и (5) по акустической схеме TTdTT, а на рис. 8б показано ЦФА-CF-изображение с учетом когерентного фактора, восстановленное по формулам (4) и (5). Для повышения разрешающей способности антенная решетка перемещалась по поверхности цилиндра (ось x_s) по пяти положениям, показанными

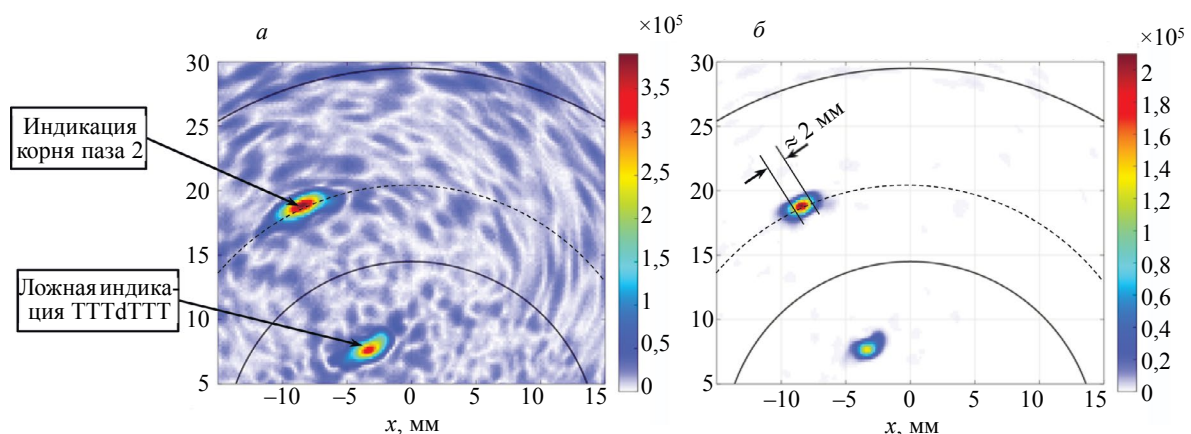


Рис. 8. ЦФА-изображение паза по акустической схеме TTdTT (а); ЦФА-CF-изображение с учетом когерентного фактора (б) при установке антенной матрицы со стороны ступеньки.

стрелками красного цвета. Координата y была зафиксирована и равна 0 мм. На изображениях сплошными линиями черного цвета нанесены границы внутренней и внешней поверхности, а пунктирной линией черного цвета показана цилиндрическая проточка диаметром около 20 мм. На обоих изображениях хорошо обнаруживается индикация корня трещины. Но на ЦФА-СФ-изображении отношение сигнал/шум увеличилось более чем на 12 дБ, а возросшая разрешающая способность позволяет оценить размеры трещины примерно как 2 мм. Изображения вне границ образца можно не восстанавливать и тогда не будет ложной индикации, сформированной эхосигналами по акустической схеме ТТdTТТ.

4.3. Паз 2 со стороны конуса

На рис. 9а показаны виды В- и D-типа ЦФА-изображения паза при размещении антенной матрицы со стороны конуса, восстановленные по формулам (2) и (5) по акустической схеме ТТdTТТ. Для повышения разрешающей способности антенная решетка перемещалась по поверхности цилиндра (ось x_s) по девяти положениям при $y = 0$ мм. При контроле со стороны конуса ось y будет развернута на 180 град, а ось x_s будет проходить так, как показано на врезке рис. 7. На изображениях сплошными линиями черного цвета нанесена граница проточки на виде D-типа, а пунктирной линией черного цвета на виде В-типа показана цилиндрическая проточка диаметром около 20 мм. На изображениях индикация корня паза хорошо обнаруживается на фоне индикации конусного перехода проточки и размер паза можно оценить примерно как 2 мм. Индикация вершины трещины, сформированная дифракционными эхосигналами, не видна на виде D-типа из-за недостаточной лучевой разрешающей способности.

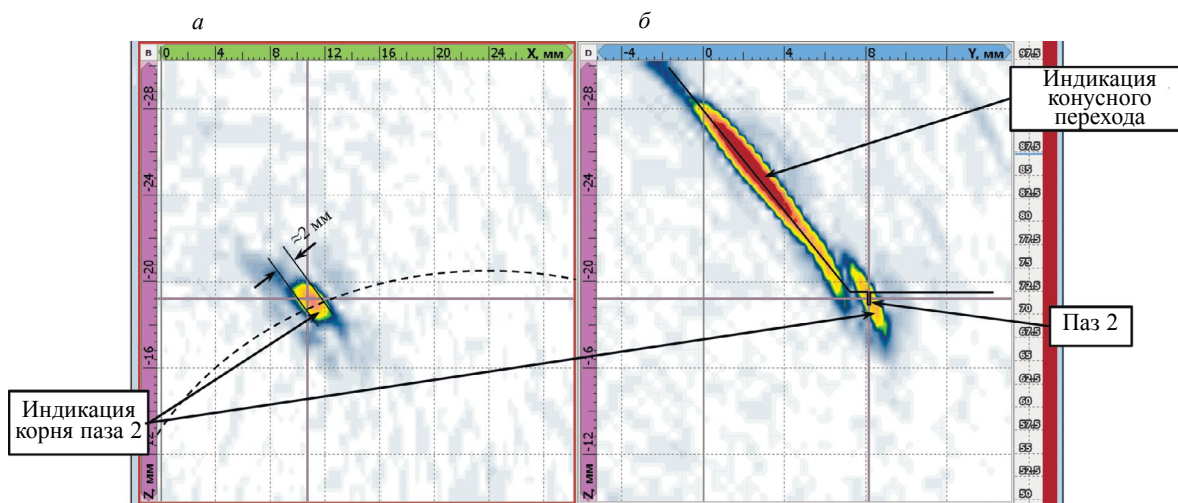


Рис. 9. ЦФА-изображение паза по акустической схеме ТТdTТТ при установке матрицы со стороны конуса: вид В-типа (а); вид D-типа (б).

5. ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам исследований, изложенных в данной статье, можно сделать следующие выводы.

При контроле толстостенных труб малого диаметра на формирование ЦФА-изображения сильное влияние оказывает кривизна поверхности: при контроле с внешней поверхности ультразвуковое поле физически фокусируется, а при контроле изнутри поле физически расфокусируется.

Поэтому при контроле с внешней поверхности из-за эффекта фокусировки можно использовать антенную решетку, но использование антенной матрицы в численных экспериментах позволило повысить разрешающую способность более чем в два раза.

Контроль толстостенных труб малого диаметра неэффективен изнутри при применении антенных решеток из-за очень низкой разрешающей способности (см. рис. 5). Использование антенной матрицы позволяет получить ЦФА-изображения в режиме 3D с разрешающей способностью на порядок выше (см. рис. 6).

ЦФА-СФ-изображения, полученные с учетом когерентного фактора, по сравнению с ЦФА-изображениями позволяют повысить разрешающую способность примерно в 1,5 раза и уменьшить уровень шума примерно на 9 дБ. Такой подход позволил в модельном эксперименте обнаружить паз длиной и высотой 2 мм на границе конусного перехода и внутренней проточки (см. рис. 9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/> (дата обращения: 07.07.2023).
2. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64—70.
3. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.
4. ISO 23865:2021. Non-destructive testing – Ultrasonic testing – General use of full matrix capture/total focusing technique (FMC/TFM) and related technologies. URL: <https://www.iso.org/standard/78034.html> (дата обращения: 28.07.2024).
5. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
6. Научно-производственная компания «Акустические Контрольные Системы»: Дефектоскоп A1550 IntroVisor: офиц. сайт: URL: <https://acsys.ru/vyisokochastotnyj-ultrazvukovoj-defektoskop-tomograf-a1550-introvisor/> (дата обращения: 23.07.2024).
7. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation // NDT&E International. 2005. V. 38. P. 701—711.
8. Kang S., Lee J., Chang J.H. Effectiveness of synthetic aperture focusing and coherence factor weighting for intravascular ultrasound imaging // Ultrasonics. 2021. V. 113. P. 106364. DOI:10.1016/j.ultras.2021.106364
9. Gauthier Baptiste, Painchaud Guillaume, Le Duff Alain, Belanger Pierre. Lightweight and Amplitude-Free Ultrasonic Imaging Using Single-Bit Digitization and Instantaneous Phase Coherence // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2022. P. 1—1. ISSN 1525-8955. DOI: 10.1109/TUFFC.2022.3163621
10. Camacho Jorge, Fritsch Carlos, Fernandez-Cruza Jorge, Parrilla Montserrat. Phase Coherence Imaging: Principles, applications and current developments // Proceedings of Meetings on Acoustics. September 2019. V. 38 (1). P. 055012. DOI: 10.1121/2.0001201. URL: <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/2.0001201> (дата обращения: 28.07.2024).
11. Базулин Е.Г. Ультразвуковой контроль сварных соединений трубопровода типа Ду800. Часть 1. Восстановление изображения отражателей методом ЦФА // Дефектоскопия. 2017. № 3. С. 12—26.
12. Chen T., Du Q., Li W., Sheng S., Zhou H. Ultrasonic Imaging Detection of Welding Joint Defects of Pressure Pipeline Based on Phased Array Technology / In 2023 International Conference on Mechatronics, IoT and Industrial Informatics (ICMIII), 2023. Melbourne, Australia. P. 375—379. DOI: 10.1109/ICMIII58949.2023.00078
13. Hampson Rory, Zhang Dayi, Gachagan Anthony, Dobie Gordon. Modelling and characterisation ultrasonic phased array transducers for pipe inspections. September 2022 // International Journal of Pressure Vessels and Piping. V. 200 (7). P. 104808. DOI:10.1016/j.ijpvp.2022.104808
14. Schmerr L.W. Jr. Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation. A Modeling Approach. Second Edition. Springer. 2016. 492 p. DOI: 10.1007/978-3-319-30463-2
15. Крохмаль А.А., Николаев Д.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А. Создание эталонной плоской ультразвуковой волны в жидкости с помощью плоского пьезоэлектрического преобразователя большого волнового размера // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 5. С. 475—488.
16. Kang S., Lee J., Chang J. H. Effectiveness of synthetic aperture focusing and coherence factor weighting for intravascular ultrasound imaging // Ultrasonics. 2021. V. 113. P. 106364. DOI:10.1016/j.ultras.2021.106364
17. Červeny V. Seismic ray theory. New York: Cambridge University Press, 2001. 713 p.
18. Бабич В.М., Киселев А.П. Упругие волны. Высокочастотная теория. СПб.: БХВ-Петербург, 2014. С. 320.
19. Moon S., Kang T., Han S., Kim K.-M., Jin H.-H., Kim S.-W., Kim M., Seo H. FEA-Based Ultrasonic Focusing Method in Anisotropic Media for Phased Array Systems // Appl. Sci. 2021. No. 11. P. 8888. DOI: 10.3390/app11198888
20. Kalkowski M.K., Lowe M.J.S., Samaitis V., Schreyer F., Robert S. Weld map tomography for determining local grain orientations from ultrasound // Proc. R. Soc. 2023. A 479. P. 20230236. <https://doi.org/10.1098/rspa.2023.0236>.
21. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / Пер. с англ. Изд. 2, испр. М.: Наука, 1973. 720 с.

22. Фирма EXTENDE: офиц. сайт URL: <https://www.extende.com/ndt> (дата обращения: 11.05.2024).
 23. Научно-производственный центр «ЭХО+»: офиц. сайт URL: <https://echoplus.ru/> (дата обращения: 11.05.2024).

REFERENCES

1. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/> (date of access: 07.07.2023).
2. Voronkov V.A., Voronkov I.V., Kozlov V.N., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. About applicability of the antenna array technology in solving the problems of ultrasonic control of hazardous production facilities // In the world of nondestructive testing. 2011. No. 1. P. 64—70.
3. Bazulin E.G. Comparison of systems for ultrasonic nondestructive testing using antenna arrays or phased antenna arrays // Defectoscopya. 2013. No. 7. P. 51—75.
4. ISO 23865:2021. Non-destructive testing – Ultrasonic testing – General use of full matrix capture/total focusing technique (FMC/TFM) and related technologies. URL: <https://www.iso.org/standard/78034.html> (дата обращения: 28.07.2024).
5. Kovalev A.V., Kozlov V.N., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G., Yakovlev N.N. Pulse echo-method at concrete control. Interferences and spatial selection // Defectoscopya. 1990. No. 2. P. 29—41.
6. Scientific and Production Company “Acoustic Control Systems”: Defectoscope A1550 IntroVisor: official website: URL: <https://acsys.ru/vyisokochastotnyj-ultrazvukovoj-defektoskop-tomograf-a1550-introvisor/> (date of reference: 23.07.2024).
7. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation // NDT&E International. 2005. V. 38. P. 701—711.
8. Kang S., Lee J., Chang J.H. Effectiveness of synthetic aperture focusing and coherence factor weighting for intravascular ultrasound imaging // Ultrasonics. 2021. V. 113. P. 106364. DOI:10.1016/j.ultras.2021.106364
9. Gauthier Baptiste, Painchaud Guillaume, Le Duff Alain, Belanger Pierre. Lightweight and Amplitude-Free Ultrasonic Imaging Using Single-Bit Digitization and Instantaneous Phase Coherence // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2022. P. 1—1. ISSN 1525-8955. DOI: 10.1109/TUFFC.2022.3163621
10. Camacho Jorge, Fritsch Carlos, Fernandez-Cruza Jorge, Parrilla Montserrat. Phase Coherence Imaging: Principles, applications and current developments // Proceedings of Meetings on Acoustics. September 2019. V. 38 (1). P. 055012. DOI: 10.1121/2.0001201. URL: <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/2.0001201> (дата обращения: 28.07.2024).
11. Bazulin E.G. Ultrasonic control of welded joints of pipeline type Du800. Part 1. Image restoration of reflectors by CFA method // Defectoscopya. 2017. No. 3. P. 12—26.
12. Chen T., Du Q., Li W., Sheng S., Zhou H. Ultrasonic Imaging Detection of Welding Joint Defects of Pressure Pipeline Based on Phased Array Technology / In 2023 International Conference on Mechatronics, IoT and Industrial Informatics (ICMIII), 2023. Melbourne, Australia. P. 375—379. DOI: 10.1109/ICMIII58949.2023.00078
13. Hampson Rory, Zhang Dayi, Gachagan Anthony, Dobie Gordon. Modelling and characterisation ultrasonic phased array transducers for pipe inspections. September 2022 // International Journal of Pressure Vessels and Piping. V. 200 (7). P. 104808. DOI:10.1016/j.ijpvp.2022.104808
14. Schmerr L.W. Jr. Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation. A Modeling Approach. Second Edition. Springer. 2016. 492 p. DOI: 10.1007/978-3-319-30463-2
15. Krokhmal A.A., Nikolaev D.A., Tysar S.A., Sapozhnikov O.A. Creation of a Reference Plane Ultrasonic Wave in a Liquid by a Plane Piezoelectric Transducer of Large Wave Size // Acoust. Jour. 2020. V. 66. No. 5. P. 475—488.
16. Kang S., Lee J., Chang J.H. Effectiveness of synthetic aperture focusing and coherence factor weighting for intravascular ultrasound imaging // Ultrasonics. 2021. V. 113. P. 106364. DOI:10.1016/j.ultras.2021.106364
17. Červený V. Seismic ray theory. New York: Cambridge University Press, 2001. 713 p.
18. Babich V.M., Kiselev A.P. Elastic waves. High-frequency theory. SPb.: BHV-Peterburg, 2014. P. 320.
19. Moon S., Kang T., Han S., Kim K.-M., Jin H.-H., Kim S.-W., Kim M., Seo H. FEA-Based Ultrasonic Focusing Method in Anisotropic Media for Phased Array Systems // Appl. Sci. 2021. No. 11. P. 8888. DOI: 10.3390/app11198888
20. Kalkowski M.K., Lowe M.J.S., Samaitis V., Schreyer F., Robert S. Weld map tomography for determining local grain orientations from ultrasound // Proc. R. Soc. 2023. A 479. P. 20230236. <https://doi.org/10.1098/rspa.2023.0236>.
21. Born M., Wolf E. Fundamentals of Optics / Transl. from Engl. Ed. 2, revised. Moscow: Nauka, 1973. 720 c.
22. Firm EXTENDE: official site URL: <https://www.extende.com/ndt> (date of reference: 11.05.2024).
23. Scientific and Production Center “ECHO+”: official website URL: <https://echoplus.ru/> (date of access: 11.05.2024).

ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ: ИМПУЛЬСНЫЙ НАГРЕВ И ОПТИМИЗИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

© 2024 г. С.Е. Черных^{1,*}, В.П. Вавилов^{2,**}, В.Н. Костин^{1,***},
Ю.И. Комоликов^{1,****}, Д.Ю. Кладов^{2,*****}

¹Институт физики металлов им. М.Н. Микеева УрО РАН,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634028 Томск, ул. Савиных, 7
E-mail: *suo@mail.ru; **vavilov@tpu.ru; ***kostin@imp.uran.ru;
****yikom@yandex.ru; *****dyk10@tpu.ru

Поступила в редакцию 19.07.2024; после доработки 26.07.2024

Принята к публикации 30.07.2024

Проведен обзор типов дефектов при производстве плиток из корундовой керамики и традиционных методов контроля целостности изделий из этого материала. Методом активного теплового контроля с применением импульсного оптического нагрева исследована целостность плиток, содержащих искусственные дефекты. Применена схема двухстороннего теплового контроля с программной обработкой исходных термограмм по методу Паркера. Установлено, что наилучшие результаты по выявлению внутренних дефектов в керамических плитках толщиной 10 мм при тепловой стимуляции с помощью ксеноновых ламп дает метод двустороннего теплового контроля с построением карт температуропроводности.

Ключевые слова: керамика, композит, дефектоскопия, термография, тепловой контроль.

THERMAL TESTING OF CORUNDUM CERAMICS: PULSE HEATING AND OPTIMIZED DATA PROCESSING ALGORITHMS

© 2024 S.E. Chernykh^{1,*}, V. P. Vavilov^{2,**}, V. N. Kostin^{1,***},
Yu. I. Komolikov^{1,****}, D. Yu. Kladov^{2,*****}

¹Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Russia 620108
Yekaterinburg, Sof'i Kovalevskoy st., 18

²National Research Tomsk Polytechnic University, Russia 634028 Tomsk, Savinykh St., 7
E-mail: *suo@mail.ru; **vavilov@tpu.ru; ***kostin@imp.uran.ru;
****yikom@yandex.ru; *****dyk10@tpu.ru

A review of the types of defects in the production of corundum ceramic tiles and traditional methods of integrity testing of products made of this material is carried out. The integrity of tiles containing artificial defects was investigated by the method of active thermal testing using pulsed optical heating. A scheme of two-way thermal testing with software processing of the initial thermograms using the Parker method is applied. It has been established that the best results in detecting internal defects in ceramic tiles with a thickness of 10 mm during thermal stimulation using xenon lamps are obtained by the method of two-way thermal testing with the construction of thermal conductivity maps.

Keywords: ceramics, composite, flaw detection, thermography, thermal testing.

DOI: 10.31857/S0130308224090027

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях одной из ключевых проблем экономического развития становится обеспечение конкурентоспособности продукции. Ее можно обеспечить за счет улучшения качества и четкой ориентации на заказчика. Очевидно, что изготовители продукции не могут привлечь и удержать потребителей, если они не рассматривают качество своей продукции в качестве стратегической цели.

В производстве плоских керамических изделий, как правило, могут встречаться дефекты следующих типов [1—4]:

- деформация — искажение формы и размера изделия;
- осевое смещение деталей;
- трещины;
- наколы — точечные углубления на поверхности;
- засорки — инородные включения (царапающие);
- пузыри и прыщи (вызваны запоздалым выделением газов);
- выбоины, щербинки, сколы.

В настоящее время контроль вышеуказанных дефектов в большинстве случаев производят вручную, что приводит к многочисленным ошибкам вследствие большой нагрузки на зрение операторов, требований напряженного внимания, ограничения времени для принятия решения при движении конвейера, т.е. всего, что приводит к быстрому развитию усталости операторов [5, 6].

Основными видами дефектов прессованных изделий являются трещины на боковой поверхности, расслоения и сколы. В некоторых случаях трещины могут быть внешне незаметны, и их можно обнаружить только используя специальные методы контроля или определяя механические характеристики изделий, а также при стендовых и полевых испытаниях. Дефекты внутренней структуры керамических плиток выявляют с помощью различных методов испытаний [7], а наиболее используемыми являются визуальный, капиллярный и рентгеновский методы.

Визуальный метод и *капиллярный метод* используют для обнаружения поверхностных трещин и рыхлостей и очень редко для обнаружения внутренних дефектов в тонкостенных изделиях, не имеющих в своем составе компонентов, которые ухудшают прохождение света через материал и затеяют общую картину внутренней структуры. При контроле в проходящем свете выявляются трещины, расслоения, раковины, посторонние включения и т.п. Метод капиллярной (цветной) дефектоскопии основан на заполнении полостей дефектов под воздействием капиллярных сил цветоконтрастными составами, в результате чего в тех местах, где имеются поверхностные трещины и рыхлоты, в которые проникли чернила, цвет детали изменяется [1, 2].

Рентгеновский метод является универсальным методом контроля внутренней структуры материала, поэтому он получил значительное распространение. Для просвечивания твердых тел используют рентгеновские аппараты, производящие мягкое (10—60 кВ) излучение. Внутреннюю структуру снимают на рентгеновскую пленку или мозаичные детекторы излучения. Для расширения возможностей метода по обнаружению дефектов внутренней структуры применяют метод компьютерной рентгеновской томографии, при котором съемку одних и тех же участков объекта контроля производят под различными углами. С помощью этого метода выявляют раковины, инородные включения, внутренние трещины размером от десятых долей миллиметра и более [8, 9].

Отечественные и зарубежные исследования в области исследования причин разрушения функциональной керамики показывают, что основной причиной потери ее работоспособности в процессе эксплуатации является хрупкое разрушение [8, 10]. Например, на отказы, вызванные хрупким разрушением, приходится до 55 % всех отказов керамики [11, 12]. Причина этого — низкие прочностные свойства и чувствительность керамики к циклическим нагрузкам и термическим ударам, что является следствием объемных и поверхностных дефектов структуры керамики, формирующихся на различных этапах ее жизненного цикла при изготовлении (прессовании и спекании), механической обработке и эксплуатации.

Например, к дефектам, возникающим в процессе прессования и спекания керамики, относятся внутренняя пористость, структурная неоднородность, конгломераты структурных составляющих, посторонние включения и примеси. Характерными дефектами механической обработки керамики являются вырывы материала и трещины [11].

Задачей настоящей работы было исследование возможности теплового контроля (ТК) объемных и поверхностных дефектов керамики, что может послужить отправной точкой развития научных подходов к повышению надежности и эксплуатационных свойств керамических изделий.

В предыдущей работе [13] мы упоминали, что корундовая керамика применяется во многих областях. С точки зрения материаловедения, современная функциональная керамика представляет собой структурно-неоднородную среду. Керамическую матрицу производят чаще всего на основе оксида алюминия, в котором равномерно распределены включения оксидов кремния, титана, циркония и других химических элементов. При ТК изделий из одного материала химический состав не будет отражаться на качестве результатов, однако представляет интерес исследование влияния примесных катионов на свойства керамики при ТК. Также с этой целью мы исследовали монокорундовую керамику, содержащую 99,5 % Al_2O_3 .

В предыдущем исследовании для обнаружения внутренних дефектов в керамических пластинах был использован активный одно- и двухсторонний ТК с применением галогенных ламп и классической обработки термограмм [13]. Использованный тип источника тепловой стимуляции в совокупности с используемыми методиками обработки данных оказались недостаточно эффективными для уверенного обнаружения ряда дефектов (например, утонения стенки образца), а также четкого определения их границ. В связи с этим в настоящей работе были применены мощный импульсный нагрев с использованием ксеноновых ламп [14], а также оптимизированные алгоритмы обработки исходных данных. Ниже представлены

результаты исследования активного двустороннего ТК плиток из корундовой керамики с искусственными дефектами, имитирующими как воздушные полости, так и утонение стенки образца. Использовали программную обработку полученных термограмм [15] с построением карт теплопроводности.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходного вещества для изготовления образцов применяли оксид алюминия (Al_2O_3) с различным содержанием спекающей добавки на основе MnO_2 . Образцы в виде плиток размером $55 \times 55 \times 10$ мм (рис. 1) изготовили методом шликерного литья в гипсовые формы. После извлечения из формы образцы сушили и подвергали предварительному обжигу при температуре 1100°C для достижения механической прочности, достаточной для формирования искусственных дефектов. Подготовленные плитки проходили окончательный совместный обжиг в воздухе при температуре 1550°C в течение 2 ч.

Согласно результатам предыдущих испытаний [13], образцы имели плотность от $3,78$ до $3,91 \text{ г/см}^3$, открытую пористость не более 1 %, твердость $16\text{--}19 \text{ ГПа}$, прочность на изгиб $280\text{--}350 \text{ МПа}$ и коэффициент теплопроводности $\sim 25 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Для исследования были выбраны четыре дефектных образца №№ 1—4 (светло-коричневого цвета) толщиной 10 мм, бездефектные контрольные образцы № 5 (светло-коричневого цвета) толщиной 10 мм и № 6 (цвет близкий к белому) толщиной 8 мм. Фотография исследованных образцов с сигнатурами проекций внутренних дефектов приведена на рис. 1.

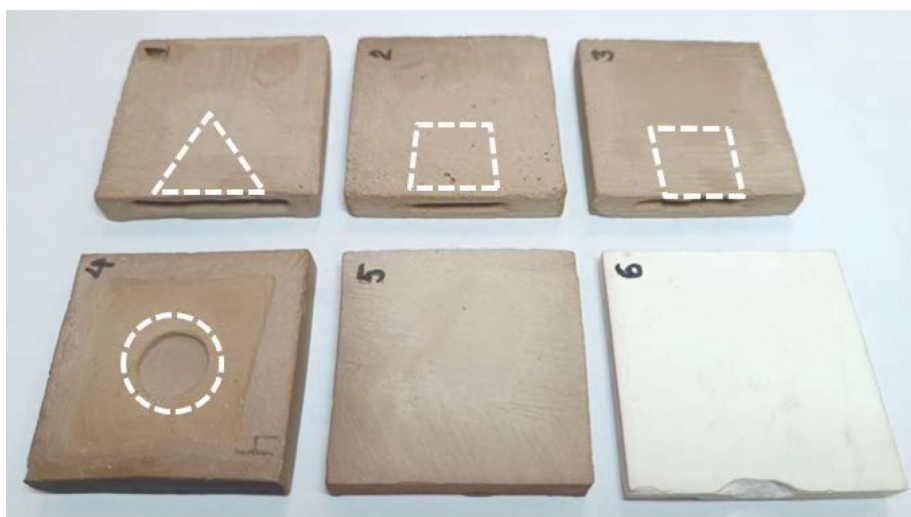


Рис. 1. Фотография образцов с сигнатурами дефектов.

Образцы содержали следующие искусственные дефекты. Образец 1 имел внутреннюю полость треугольной формы с длиной стороны 30 мм и остаточной толщиной стенки около 3 мм с обеих сторон изделия. Образцы 2 и 3 имели внутреннюю полость квадратной формы с длиной стороны 17 мм и остаточной толщиной стенки около 3 мм с обеих сторон изделия. Образец 4 имел утонение стенки до 2 мм в форме круга диаметром 14 мм по центру изделия. Бездефектный образец 6, в отличие от остальных образцов, не содержал спекающих добавок и являлся монокорундовым с содержанием Al_2O_3 99,5 %.

Образцы были исследованы с использованием методики двухстороннего активного ТК, предусматривающей бесконтактный оптический нагрев поверхности контролируемого изделия с одновременной регистрацией инфракрасных (ИК) термограмм [16], отражающих распределение температуры на контролируемой поверхности в пространстве и во времени, с помощью тепловизора. Схема ТК приведена на рис. 2.

В качестве импульсного источника нагрева использовали две ксеноновые лампы общей энергией 6,4 кДж и длительностью импульса около 10 мс. Тепловизор Optris PI 450 с температурной чувствительностью $0,06^\circ\text{C}$, матрицей из 320×240 элементов и максимальной частотой съемки 30 Гц регистрировал изменение температуры контролируемой поверхности в течение некоторого времени, определяемого длительностью процедуры неразрушающего контроля

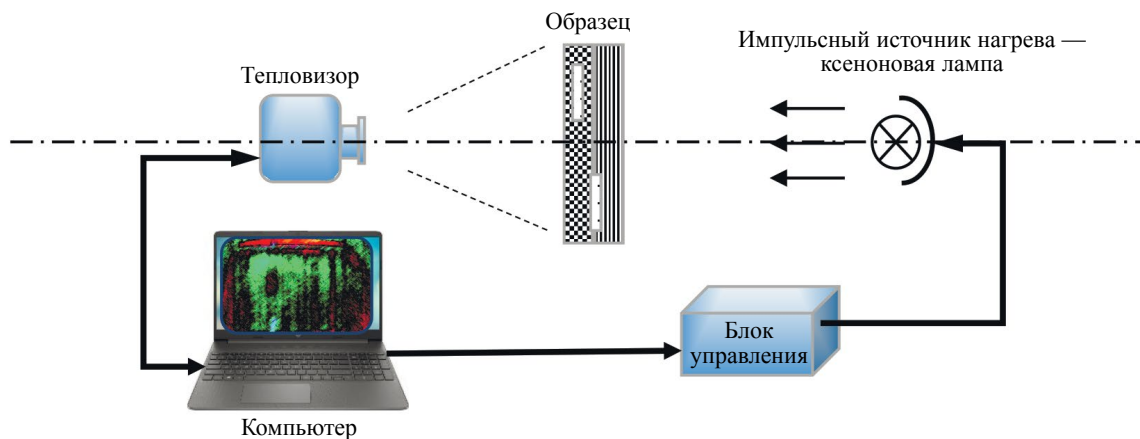


Рис. 2. Схема двухстороннего ТК.

(НК) на обратной стороне изделия для различных образцов. Частота записи выбрали равной 18 Гц, т.е. интервал записи термограмм составлял 55,6 мс.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе для повышения информативности и достоверности ТК помимо стандартного анализа исходных термограмм использовали построение карт температуропроводности в качестве специфического алгоритма обработки данных.

На рис. 3 показана термограмма контрольного бездефектного образца 5 при двухстороннем ТК с профилем изменения средней температуры в выбранной зоне квадратной формы. В теплофизических измерениях профили температуры такого вида иногда называют Паркеровскими, поскольку их используют для определения температуропроводности материалов a по методу Паркера [17]. Сущность метода состоит в нахождении специфических точек на кривой нагрева (рис. 4) и определении соответствующих характерных времен теплопередачи, используемых для вычисления температуропроводности. Как правило, используют точку половинного сигнала $T_{\max}/2$, и соответствующее ей время $t_{1/2}$, после чего величину a определяют с учетом толщины материала L по формуле Паркера [17]:

$$a = 0,139 \frac{L^2}{t_{1/2}}. \quad (1)$$

Предложен ряд модификаций формулы Паркера, учитывающих влияние не адиабатичность процесса, конечную длительность нагрева и др., однако для построения карт температуропроводности в ТК эти уточнения базового алгоритма не имеют существенного значения.

Поскольку обработка по данному алгоритму происходит во временной области, то считают, что результаты ТК более устойчивы к вариациям амплитудных помех [18]. Алгоритм определения a входит в программу обработки экспериментальных данных ThermoLab Томского политехнического университета.

Результаты для бездефектных образцов 5 и 6 приведены на рис. 3 и 5. Например, для образца 5 температуропроводность определена на уровне $a = 3,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Для образца 6 толщиной 8 мм оценка температуропроводности дала $3,77 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, что отражает изменение физико-химических свойств материала данного изделия (см. фото на рис. 1).

Результаты ТК дефектных образцов 1—4 приведены на рис. 6—9. Оценка температуропроводности в дефектных областях дала величины $(2,5 - 2,9) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Сигнатуры дефектов при импульсном нагреве хорошо идентифицируются как на исходных термограммах, так и на картах температуропроводности в особенности.

Также следует отметить, что целью исследования не являлось метрологическое определение температуропроводности, однако результаты, полученные с использованием импульсного нагрева ксеноновыми лампами, являются более надежными по сравнению с длительным нагревом другими оптическими источниками, в частности, галогенными лампами.

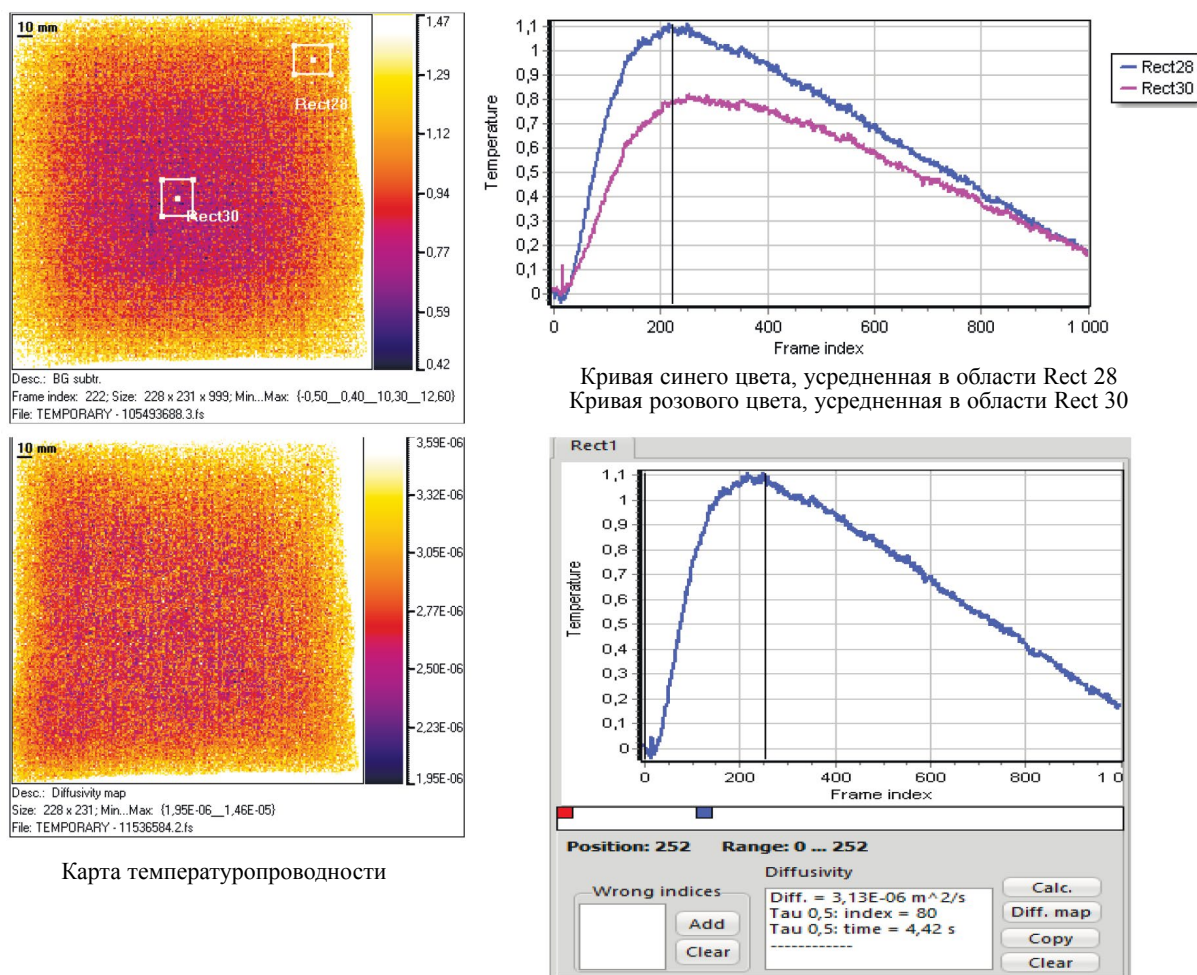


Рис. 3. Исходная термограмма и профиль температуры во времени, а также карта температуропроводности при двух-стороннем ТК бездефектного образца 5.

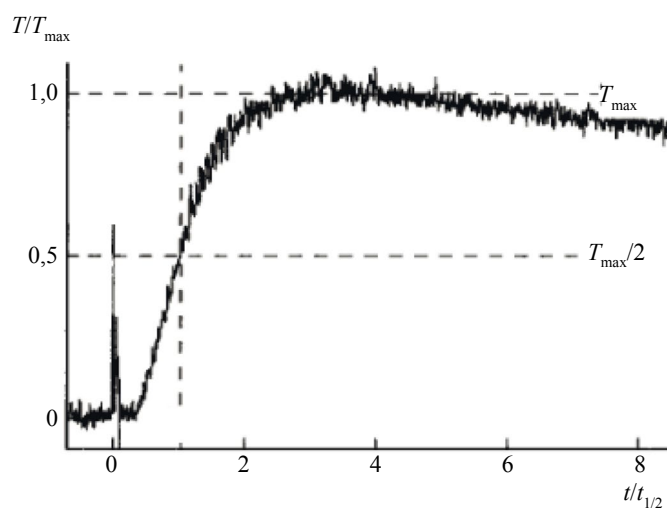


Рис. 4. Кривая нагрева — график зависимости температуры обратной поверхности образца от времени при определении температуропроводности по методу Паркера (ГОСТ Р 57943—2017).

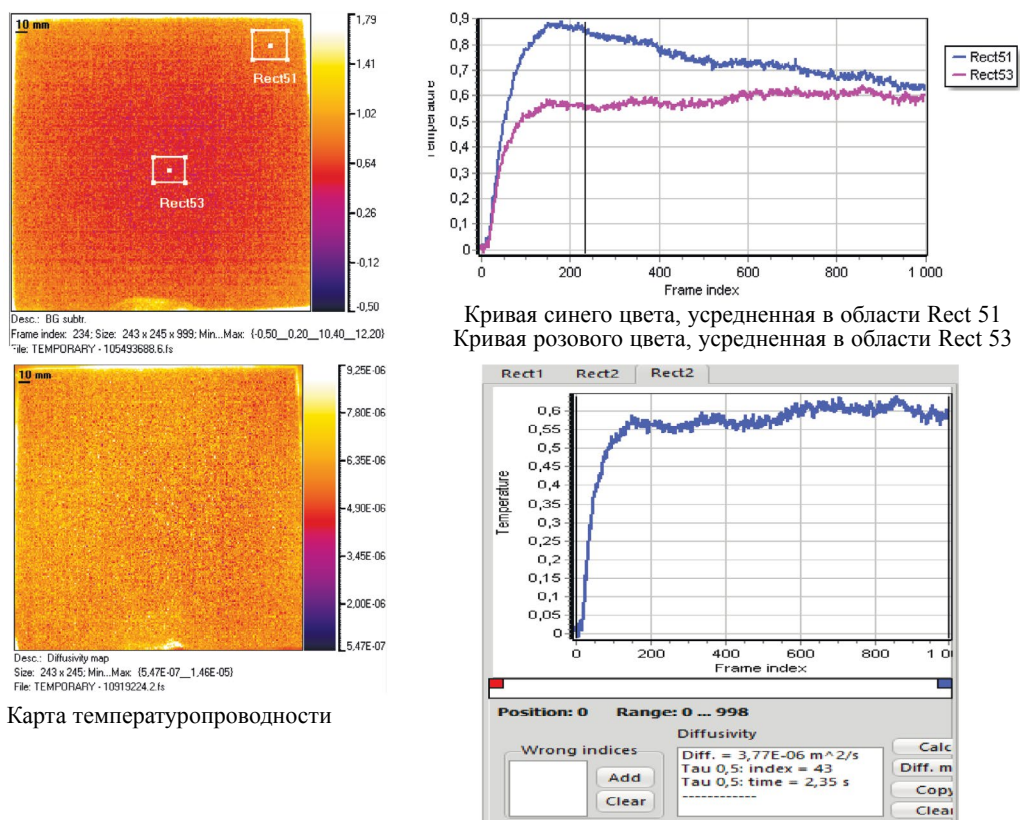


Рис. 5. Исходная термограмма и профиль температуры во времени, а также карта температуропроводности при двухстороннем ТК бездефектного образца 6.

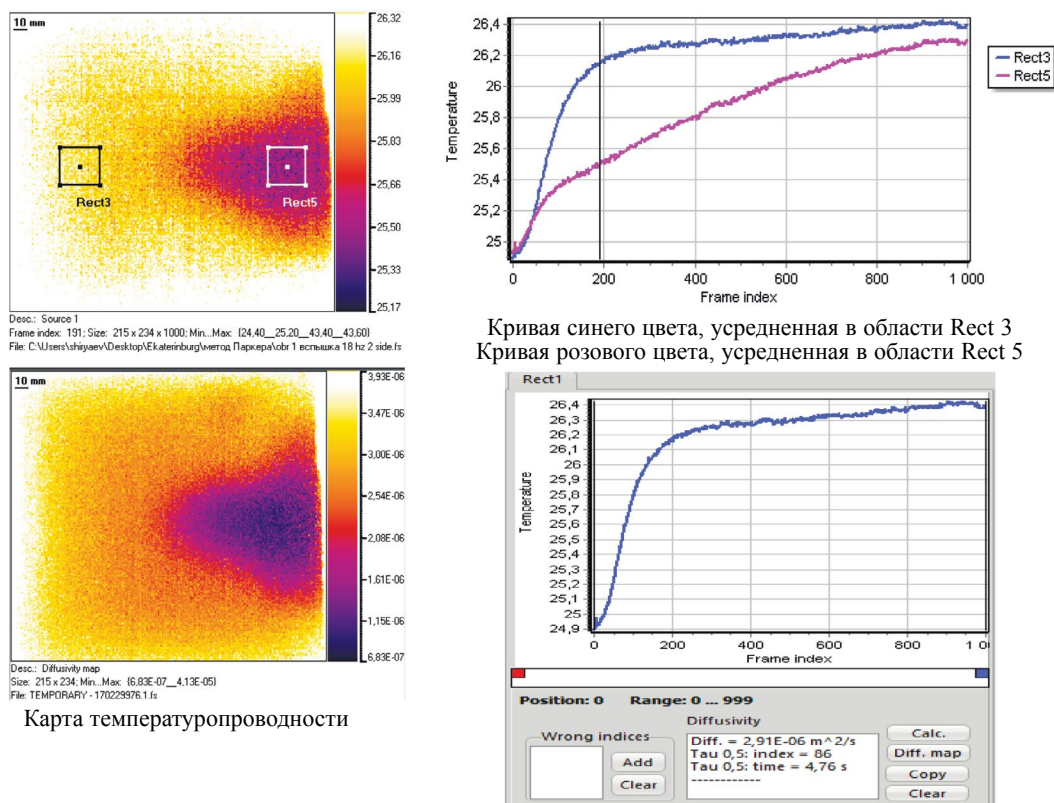


Рис. 6. Исходная термограмма и профиль температуры во времени, а также карта температуропроводности при двухстороннем ТК дефектного образца 1.

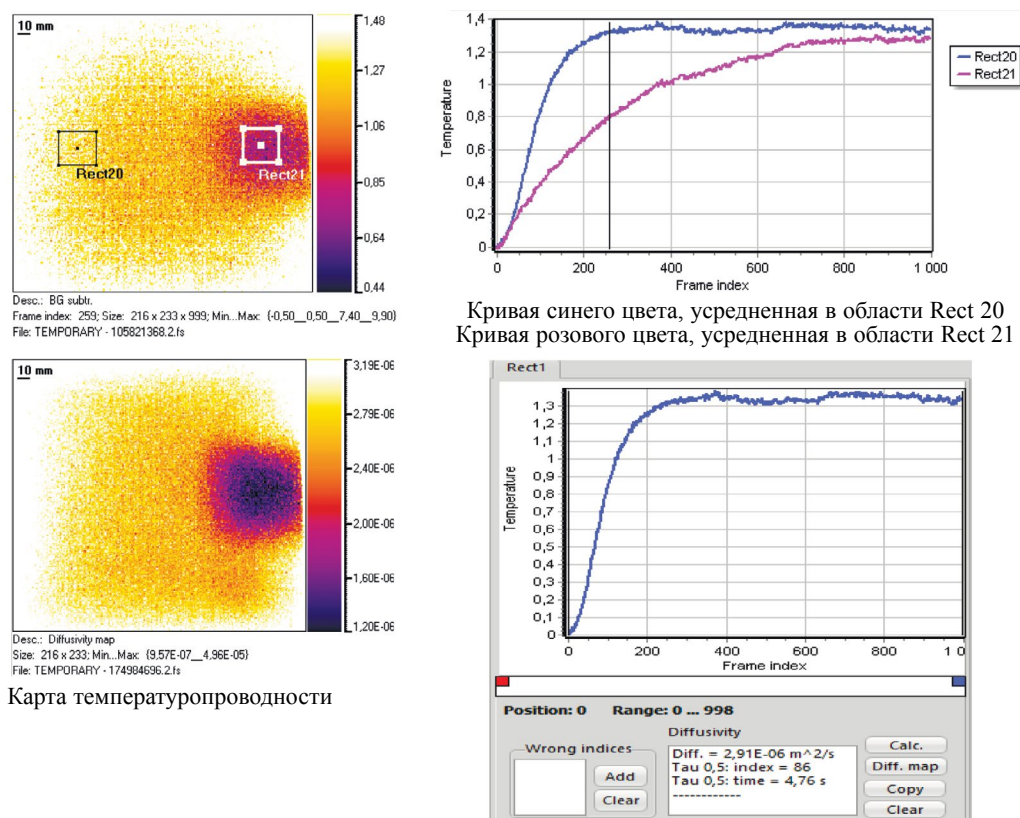


Рис. 7. Исходная термограмма и профиль температуры во времени, а также карта температуропроводности при двух-стороннем ТК дефектного образца 2.

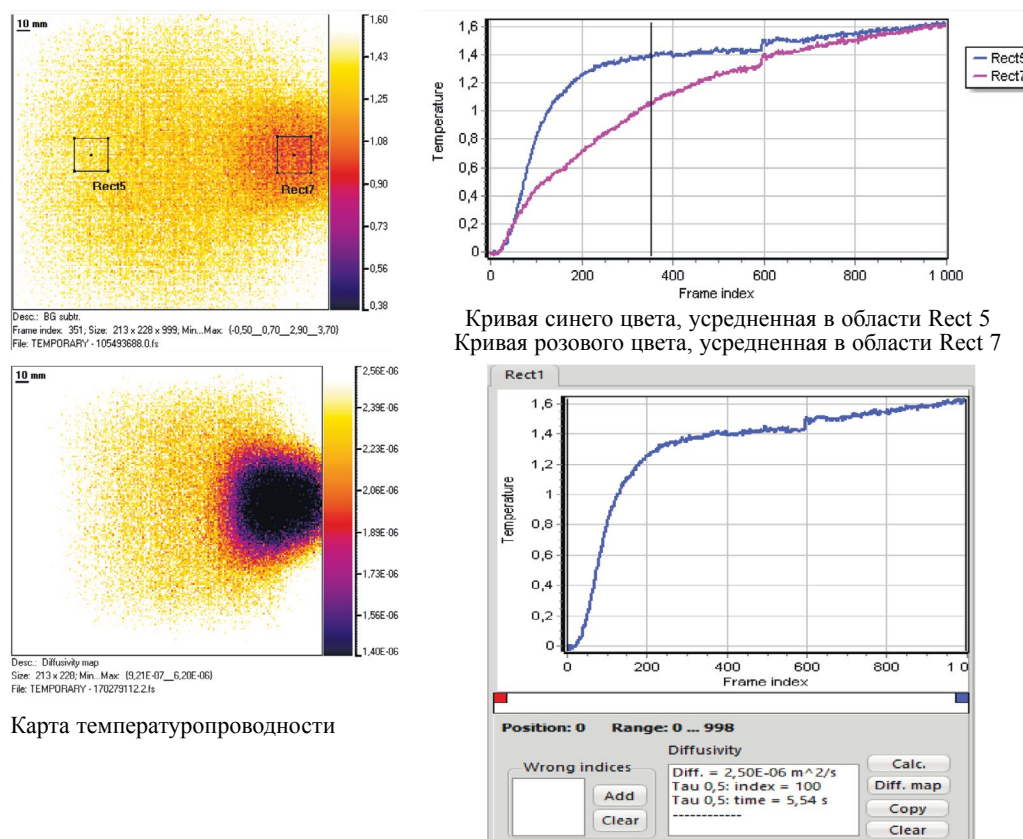


Рис. 8. Исходная термограмма и профиль температуры во времени, а также карта температуропроводности при двух-стороннем ТК дефектного образца 3.

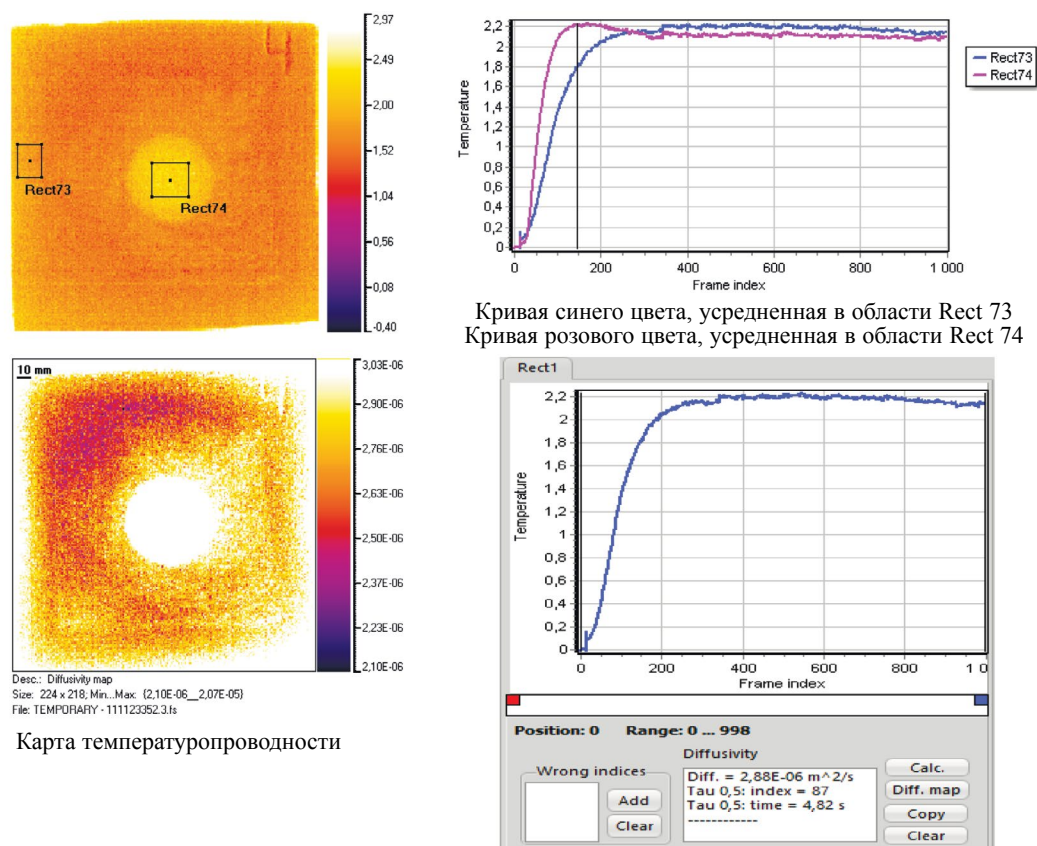


Рис. 9. Исходная термограмма и профиль температуры во времени, а также карта температуропроводности при двухстороннем ТК дефектного образца 4.

ВЫВОДЫ

В активном ТК применение импульсных ксеноновых ламп позволяет идентифицировать скрытые дефекты в корундовой керамике как на исходных термограммах, так и на картах температуропроводности, которые получают путем обработки динамических температурных сигналов во временной области. Надежно определяются как сами дефектные области, так и формы дефектов с учетом диффузии тепла в поперечных направлениях. В частности, в исследованных дефектных образцах корундовой керамики наличие скрытых воздушнонаполненных дефектов приводило к изменению температуропроводности на 7—20 %. Сравнение данных, полученных с использованием метода Паркера для экспериментального определения температуропроводности бездефектных образцов 5 и 6, позволяет сделать вывод о том, что данная теплофизическая характеристика является структурно-чувствительной (изменение температуропроводности составило 17 %) и может применяться в том числе для контроля наличия спекающих добавок в исследуемых керамических материалах.

Результаты исследований показывают, что наиболее эффективным с точки зрения выявления дефектов является двухсторонний тепловой контроль при использовании в качестве источников нагрева импульсных ксеноновых ламп с построением карт температуропроводности. Этот подход может быть рекомендован для дефектоскопии структуры плиток из корундовой керамики и обнаружения как внутренних, так и наружных несплошностей, которые могут возникать в процессе производства.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов Н.Т., Балкевич В.Л., Беляков А.В., Власов А.С., Гузман И.Я., Лукин Е.С., Мосин Ю.М., Скидан Б.С. Химическая технология керамики / Учеб. пособие для вузов. Под ред. И.Я. Гузмана. М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2012. 496 с.

2. *Гурьева В.А.* Проектирование производства изделий строительной керамики / Учебное пособие. Оренбург: ОГУ, 2013. 179 с.
3. *Тимохова М.И.* Причины возникновения брака в технической керамике при прессовании на пресс-автомате // Стекло и керамика. 2004. Т. 77. № 2. С. 19—25. УДК 666.65.032.6
4. *Kingery W.D., Vandiver P.B.* Ceramic Masterpieces. Art, Structure and Technology. New-York; London: Free Press, 1986. 339 p.
5. *Горлов М.И., Емельянов В.А., Ануфриев Д.Л.* Технологические отбраковочные и диагностические испытания полупроводниковых изделий. Минск: Бел. наука, 2006. 367 с.
6. *Karimi M.H., Asemani D.* Surface defect detection in tiling Industries using digital image processing methods: Analysis and evaluation // ISA Transactions. 2014. V. 53. P. 834—844.
7. *Zhike Z.* Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics // Ceramics International. 2021. V. 47. No. 4. P. 4389—4397.
8. *Клюев В.В., Соснин Ф.Р.* Теория и практика радиационного контроля / Учеб. пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1998. 170 с.
9. *Румянцев С.В., Штань А.С., Гольцев В.А.* Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля. М.: Энергоиздат, 1982. 240 с.
10. *Griffith A. A.* The phenomena of rupture and flow in solids // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. 1921. V. 221. No. 2. P. 163—198 / В книге: Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения. Курс лекций. СПб.: Профессия, 2012. Приложение 1. С. 435—461.
11. *Бахареv В.П., Верещака А.С., Яковчик Е.В.* Обеспечение качества поверхности и производительности обработки изделий из керамических материалов на операциях доводки фиксированным абразивом // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 2. С. 56—60.
12. *Hocenski Ž., Keser T.* Failure Detection and Isolation in Ceramic Tile Edges Based on Contour Descriptor Analysis / 15th Mediterranean Conference on Control & Automation, Athens. 2007. 6 p. DOI: 10.1109/MED.2007.4433713
13. *Черных С.Е., Вавилов В.П., Костин В.Н., Комоликов Ю.И., Кладов Д.Ю.* Тепловой контроль корундовой керамики: классические методики при оптическом нагреве // Дефектоскопия. 2024. № 7. С. 42—52.
14. *Вавилов В.П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль (2-е издание). М.: ИД «Спектр», 2013. 545 с.
15. *Вавилов В.П.* Тепловой неразрушающий контроль: развитие традиционных направлений и новые тенденции (обзор) // Дефектоскопия. 2023. № 6. С. 38—58.
16. *D. 'Accardi E., Palumbo D., Errico V., Fusco A., Angelastro A., Galietti U.* Analysing the Probability of Detection of Shallow Spherical Defects by Means of Pulsed Thermography // J. Nondestruct. Eval. 2023. V. 42. No. 27.
17. *Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbot G.L.* Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity // J. Appl. Physics. 1961. V. 32. No. 9. P. 1679—1684.
18. *Вавилов В.П., Торгунаков В.Г., Нестерук Д.А., Маринетти С., Бизон П., Гринцато Э.* Определение теплофизических характеристик материалов методом ИК термографии // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. 2006. Т. 309. № 2. С. 130—134.

REFERENCES

1. *Andrianov N.T., Balkevich V.L., Beliaikov A.V., Vlasov A.S., Guzman I.Ia., Lukin E.S., Mosin Iu.M., Skidan B.S.* Khimicheskaya tekhnologiya keramiki: ucheb. posobie dlia vuzov (Chemical technology of ceramics: a textbook for universities) / Prof. I.Ia. Guzman, Ed. Moscow: OOO RIF «Stroimaterialy», 2012. 496 p. (In Russian).
2. *Gur'eva V.A.* Proektirovanie proizvodstva izdelii stroitel'noi keramiki: uchebnoe posobie (Designing the production of building ceramics: a textbook). Orenburg: OGU, 2013. 179 p. (In Russian).
3. *Timokhova M.I.* Prichiny vozniknoveniia braka v tekhnicheskoi keramike pri pressovanii na press-avtomate (The causes of defects in technical ceramics during pressing on a press machine) // Steklo i keramika. 2004. V. 77. No. 2. P. 19—25 (in Russian).
4. *Kingery W.D., Vandiver P.B.* Ceramic Masterpieces. Art, Structure and Technology. New-York; London: Free Press, 1986. 339 p.
5. *Gorlov, M.I., Emel'ianov V.A., Anufriev D.L.* Tekhnologicheskie otrakovochnye i diagnosticheskie ispytaniia poluprovodnikovyykh izdelii (Technological rejection and diagnostic tests of semiconductor products). Minsk: Bel. nauka, 2006. 367 p. (In Russian).
6. *Karimi M.H., Asemani D.* Surface defect detection in tiling Industries using digital image processing methods: Analysis and evaluation // ISA Transactions. 2014. V. 53. P. 834—844.
7. *Zhike Z.* Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics // Ceramics International. 2021. V. 47. No. 4. P. 4389—4397.
8. *Kliuev V.V., Sosnin F.R.* Teoriia i praktika radiatsionnogo kontrolya: Uchebn. posobie dlia studentov vuzov (Theory and practice of radiation testing: Textbook for university students). Moscow: Mashinostroyeniye, 1998. 170 p. (In Russian).

9. Rumiantsev S.V., Shtan' A.S., Gol'tsev V.A. Spravochnik poradiatsionnym metodam nerazrushaiushchego kontrolya (Handbook of radiation non-destructive testing methods). Moscow: Energoizdat, 1982. 240 p. (In Russian).
10. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. 1921. V. 221. No. 2. P. 163—198 / The mechanics of destruction. A course of lectures., SPb.: Professia, 2012. Prilozhenie 1. P. 435—461 (in Russian).
11. Bakharev V.P., Vereshchaka A.S., Iakovchik E.V. Obespechenie kachestva poverkhnosti i proizvoditel'nosti obrabotki izdelii iz keramicheskikh materialov na operatsiiakh dovodki fiksirovannym abrazivom (Ensuring the surface quality and processing performance of ceramic products during finishing operations with a fixed abrasive) // Vestnik MGTU «STANKIN». 2011. No 2. P. 56—60 (in Russian).
12. Hocenski Z., Keser T. Failure Detection and Isolation in Ceramic Tile Edges Based on Contour Descriptor Analysis / 15th Mediterranean Conference on Control & Automation, Athens, 2007. 6 p. DOI: 10.1109/MED.2007.4433713
13. Chernykh S.E., Vavilov V.P., Kostin V.N., Komolikh Iu.I., Kladov D.Iu. Teplovoi kontrol' korundovoi keramiki: klassicheskie metodiki pri opticheskom nagreve (Thermal testing of corundum ceramics: classical techniques for optical heating) // Defektoskopiya. 2024. No. 7. P. 42—52 (in Russian).
14. Vavilov V.P. Infrazrasnaia termografiia i teplovoi kontrol' (Infrared thermography and thermal control) (2-e izdanie). Moscow: ID «Spektr», 2013. 545 p. (In Russian).
15. Vavilov V.P. Teplovoi nerazrushaiushchii kontrol': razvitie traditsionnykh napravlenii i novye tendentsii (obzor). (Thermal non-destructive testing: the development of traditional directions and new trends (review)) // Defektoskopiya. 2023. No. 6. P. 38—58 (in Russian).
16. D. 'Accardi E., Palumbo D., Errico V., Fusco A., Angelastro A., Galietti U. Analysing the Probability of Detection of Shallow Spherical Defects by Means of Pulsed Thermography // J. Nondestruct Eval. 2023. V. 42. No. 27.
17. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbot G.L. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity // J. Appl. Physics. 1961. V. 32. No. 9. P. 1679—1684.
18. Vavilov V.P., Torgunakov V.G., Nesteruk D.A., Marinetti S., Bizon P., Grintsato E. Opredelenie teplofizicheskikh kharakteristik materialov metodom IK termografii (Determination of thermophysical characteristics of materials by IR thermography) // Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Izvestiia TPU]. 2006. V. 309. No 2. P. 130—134 (in Russian).

ВЛИЯНИЕ ДВУХОСНОГО СИММЕТРИЧНОГО РАСТЯЖЕНИЯ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СОСТАВНОГО ОБРАЗЦА ИЗ ДВУХ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН С РАЗЛИЧНЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ И МАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

© 2024 г. А.Н. Мушников^{1,*}, А.М. Поволоцкая^{1,2,**}, С.М. Задворкин¹, К.Д. Крючева^{1,***}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, Россия 620049 Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18
E-mail: *mushnikov@imach.uran.ru; **anna.povolotskaya.68@mail.ru; ***kristina.kryucheva@mail.ru

Поступила в редакцию 11.07.2024; после доработки 03.08.2024

Принята к публикации 12.08.2024

Приведены результаты изучения эволюции магнитных характеристик двухслойного материала, имеющего в своем составе различающиеся по магнитной твердости слои из отожженной листовой низкоуглеродистой стали марки 15 и листовой метастабильной аустенитной стали 12X18H9T, подвергнутой холодной прокатке с обжатием 50 %, при двухосном симметричном растяжении. Эксперименты по двухосному деформированию выполнены на оригинальной двухосной испытательной машине, позволяющей определять физические свойства материалов в процессе упругопластического деформирования независимо по двум осям. Показано, что в качестве информативного параметра для оценки напряжений и деформаций исследованного двухслойного материала может быть использована его коэрцитивная сила, монотонно изменяющаяся во всем диапазоне упругопластического двухосного деформирования.

Ключевые слова: деформация, двухосное симметричное растяжение, двухслойный материал, коэрцитивная сила.

EFFECT OF SYMMETRICAL BIAXIAL TENSION ON THE MAGNETIC PROPERTIES OF THE COMPOSITE SPECIMEN OF TWO STEEL PLATES WITH DIFFERENT MECHANICAL AND MAGNETIC PROPERTIES

© 2024 A.N. Mushnikov^{1,*}, A.M. Povolotskaya^{1,2,**}, S.M. Zadvorkin¹, K.D. Kryucheva^{1,***}

¹Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

²M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

E-mail: *mushnikov@imach.uran.ru; **anna.povolotskaya.68@mail.ru; ***kristina.kryucheva@mail.ru

The results of studying the behavior of the magnetic characteristics of two-layer material containing layers of annealed sheet low-carbon Steel 15 and sheet metastable austenitic 12Kh18N9T steel, subjected to cold rolling with a compression of 50 %, under biaxial symmetric tension have been presented. Experiments on biaxial deformation were carried out on the original biaxial testing machine, allowed to determine the physical properties of materials during elastic-plastic deformation independently along two axes. It has been shown that the coercive force of the studied two-layer material vary monotonically over the entire range of elastic-plastic biaxial deformation and can be used as an informative parameter for assessing the it's stresses and deformations.

Keywords: deformation, symmetric biaxial tension, two-layer material, coercive force.

DOI: 10.31857/S0130308224090031

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов является диагностика их напряженно-деформированного состояния. Для решения данной задачи применительно к ферромагнитным объектам представляется перспективным использование возможностей магнитной структуроскопии. Проблематике определения взаимосвязей между магнитными свойствами ферромагнетиков и параметрами их напряженного состояния с целью создания методики диагностики состояния изделий из таких материалов посвящено большое количество научных трудов, например, [1—11]. Однако преобладающая часть перечисленных работ сосредоточена на рассмотрении данного вопроса лишь для условий более простого, одноосного нагружения в упругой или пластической областях деформаций. В реальных же условиях,

как правило, ферромагнитные элементы конструкций подвержены более сложным воздействиям, нежели одноосное сжатие или растяжение.

Исследования влияния двухосного напряженного состояния на магнитные характеристики начались сравнительно недавно и носят в литературе пока фрагментарный характер [12—24]. Следует отметить, что в работах [19—24] отражены также сведения и об использованных в исследованиях испытательных машинах, позволяющих получить произвольное плоское напряженное состояние.

Между тем в большинстве работ, упомянутых выше, объектом исследований служили однородные ферромагнитные материалы, такие как электротехнические и конструкционные стали. Однако в настоящее время во многих отраслях промышленности все более широкое применение находят композиционные материалы, в частности, слоистые, имеющие в своем составе слои с различными физическими, в том числе магнитными, свойствами. Среди них поверхностно упрочненные изделия, сварные соединения, биметаллические материалы и многие другие. Деформационное поведение таких материалов имеет свою специфику по сравнению с однородными материалами, поскольку различия в структуре, физико-механических и магнитных свойствах составляющих слоев в условиях внешних воздействий приводят к различному напряженному состоянию отдельных компонент.

Известен ряд публикаций, таких как, например, [25—28], в которых представлены экспериментальные результаты по изучению характера поведения магнитных характеристик многослойных материалов при силовом воздействии, однако исследования во всех этих работах ограничиваются рассмотрением простого случая одноосного нагружения. Работ, анализирующих эволюцию магнитных свойств двухслойных материалов в условиях двухосного нагружения, авторами не обнаружено.

В силу этого представляет интерес изучение влияния плоского напряженно-деформированного состояния на магнитные характеристики двухслойного составного материала, имеющего в своем составе слои различной магнитной жесткости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования в качестве модельного образца служил двухслойный составной материал «магнитотвердая сталь — магнитомягкая сталь», магнитомягкий слой которого представлял собой отожженную листовую низкоуглеродистую сталь марки 15 толщиной 6 мм, а магнитотвердый слой — листовую метастабильную аустенитную сталь 12Х18Н9Т, подвергнутую холодной прокатке с обжатием 50 %, с 12 до 6 мм. В результате прокатки содержание ферромагнитного α' -мартенсита деформации в этой стали составляло примерно 80 %.

Химический состав компонент составного материала, определенный на оптическом эмиссионном спектрометре SPECTROMAXx, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследованных сталей, масс. %

Марка стали	C	Cr	Ni	Cu	Si	Mn	Mo	Co	Ti	Fe
15	0,16	0,02	0,04	0,06	0,16	0,44	—	0,02	—	Ост.
12Х18Н9Т	0,07	18,58	8,47	0,28	0,56	1,13	0,26	0,13	0,25	Ост.

Для исследований влияния напряжений и деформаций при плоском напряженном состоянии на магнитные характеристики из каждой стали были изготовлены крестообразные образцы. С целью обеспечения деформирования преимущественно центральных участков образцов с одной стороны образцов в центре были фрезерованы круговые выборки диаметром 50 мм и галтелями радиусом 5 мм. Толщина центральной части образцов каждой стали составляла 1 мм. При испытаниях составного образца их компоненты плоскими сторонами соединяли болтами в районе головок образцов.

Для определения механических свойств материала были дополнительно изготовлены разрывные образцы и проведены испытания в соответствии с ГОСТ 1497—84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» на гидравлической испытательной машине Tinius Olsen Super L-60. Диаграммы деформирования представлены на рис. 1. Были получены следующие значения механических характеристик: у магнитомягкой компоненты (сталь 15) — предел текучести 280 МПа, временное сопротивление 430 МПа, относительное удлинение при разрыве 35 %;

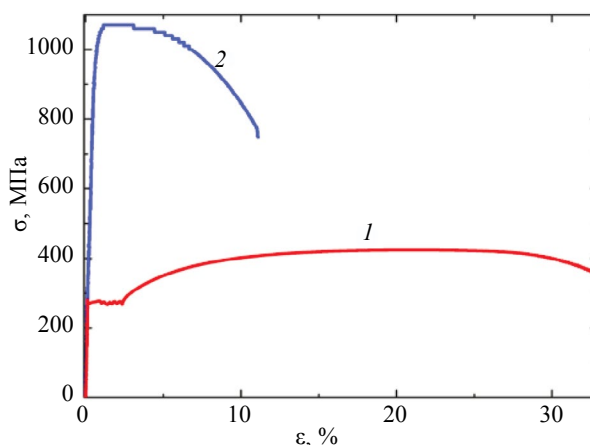


Рис. 1. Диаграммы «напряжение — деформация» сталей, являющихся компонентами в исследованном составном материале. Кривые: 1 — сталь 15; 2 — сталь 12Х18Н9Т.

у магнитотвердой компоненты (прокатанная сталь 12Х18Н9Т) — условный предел текучести 1020 МПа, временное сопротивление 1070 МПа, относительное удлинение при разрыве 11 %.

Эксперименты с двухосным деформированием проводили на оригинальной двухосной испытательной машине [29]. Особенность ее конструкции заключается в отсутствии в рабочей зоне элементов из ферромагнитных материалов, которые могли бы искажать результаты магнитных измерений. Конструкция машины рассчитана на максимальное усилие по каждой оси до 50 кН. В проведенных экспериментах нагрузка по каждой оси на составном образце ограничивалась 50 кН, а при испытаниях отдельных компонент — 30 кН. Фотография рабочей зоны с составным крестообразным образцом представлена на рис. 2.

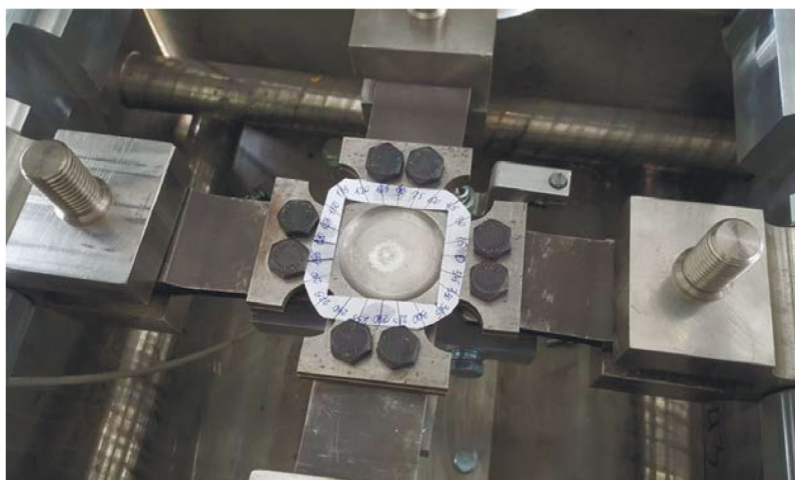


Рис. 2. Фотография рабочей зоны испытательной машины с установленным двухслойным крестообразным образцом.

Магнитные свойства образцов в процессе упругопластического деформирования определяли с помощью приставного магнитного устройства (ПМУ) с намагничивающей и измерительной обмотками. Измерительная обмотка индукции была подключена к флюксметру EF-5 магнитоизмерительного комплекса Remagraph C-500, а намагничивающая катушка ПМУ — к стабилизированному источнику тока этого комплекса. Значение тока в намагничивающей обмотке, пропорциональное магнитному полю, было переведено в единицы А/см с помощью коэффициента, определенного по коэрцитивной силе материала (следует отметить, что определяемое таким образом поле не соответствует внутреннему магнитному полю во всем исследуемом диапазоне). Величина магнитного потока в измерительной обмотке переведена в

значения магнитной индукции магнитопровода B_r с учетом сечения полюса ПМУ и количества витков измерительной обмотки. Частота перемагничивания составляла 0,03 Гц. Таким образом были получены петли магнитного гистерезиса образцов, эволюция параметров которых имеет качественную (но не количественную) связь с изменением магнитных свойств исследуемых материалов. Для единообразного расположения ПМУ под различными углами на образцы были наклеены трафареты с угловой шкалой, как это показано на рис. 2. Измерения магнитных свойств составного образца осуществляли, размещая приставной электромагнит со стороны магнитотвердой компоненты (стали 12Х18Н9Т). При таком варианте расположения ПМУ магнитный поток захватывает как магнитотвердую, так и магнитомягкую части составного образца, а не локализуется, как было бы в случае расположения ПМУ со стороны стали 15, почти полностью в прилегающей к датчику магнитомягкой компоненте в силу ее более высокой магнитной проницаемости.

Выбранная система координат показана на рис. 3. Координатные оси x и y являются осями приложения нагрузок. Угол α поворота ПМУ отсчитывался от горизонтальной (см. рис. 3) оси x . Измерения магнитных характеристик проводили при варьировании угла α от 0 до 90° с шагом 15°. Подразумевая симметрию магнитных свойств, на графиках в следующих разделах данные экстраполированы на все 360°.

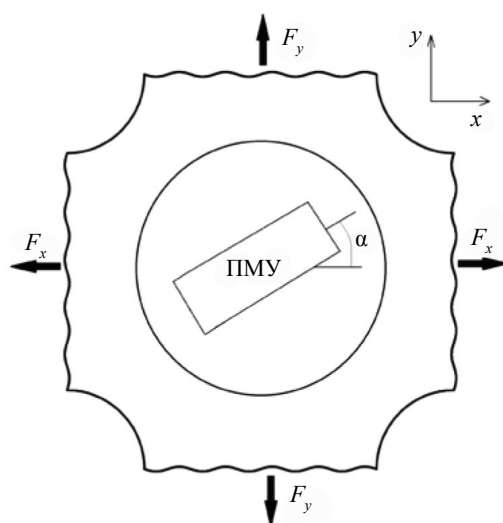


Рис. 3. Схема установки приставного магнитного устройства в рабочей зоне образца под углом α к оси x .

На каждом этапе нагружения с помощью приставного магнитного устройства были измерены петли магнитного гистерезиса во всех направлениях, т.е. изменении угла α от 0 до 90° с шагом 15°, и по ним определены коэрцитивная сила H_c , остаточная индукция B_r , максимальная магнитная проницаемость и дифференциальная магнитная проницаемость.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

С помощью программного пакета COMSOL Multiphysics было выполнено конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния составного крестообразного образца и его отдельных частей.

На рис. 4 приведены результаты моделирования напряженного состояния (эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{эКВ}}$ по Мизесу [30]) каждой отдельной компоненты стали 15 (рис. 4а) и стали 12Х18Н10Т (рис. 4б) при симметричном двухосном растяжении с нагрузкой 30 кН по каждой из осей. Из рисунка следует, что напряжения в зоне выборки в центральной части образцов распределены равномерно. Это позволяет проводить исследования различных физических характеристик исследуемого материала приставными устройствами, габариты которых позволяют их размещение в этой зоне. Согласно рис. 4а, при нагрузке 30 кН образец из стали 15 достигает развитой пластической деформации. Напряжения у образца из стали 12Х18Н9Т примерно в 2,5 раза больше и тоже соответствуют стадии пластической деформации. Как вид-

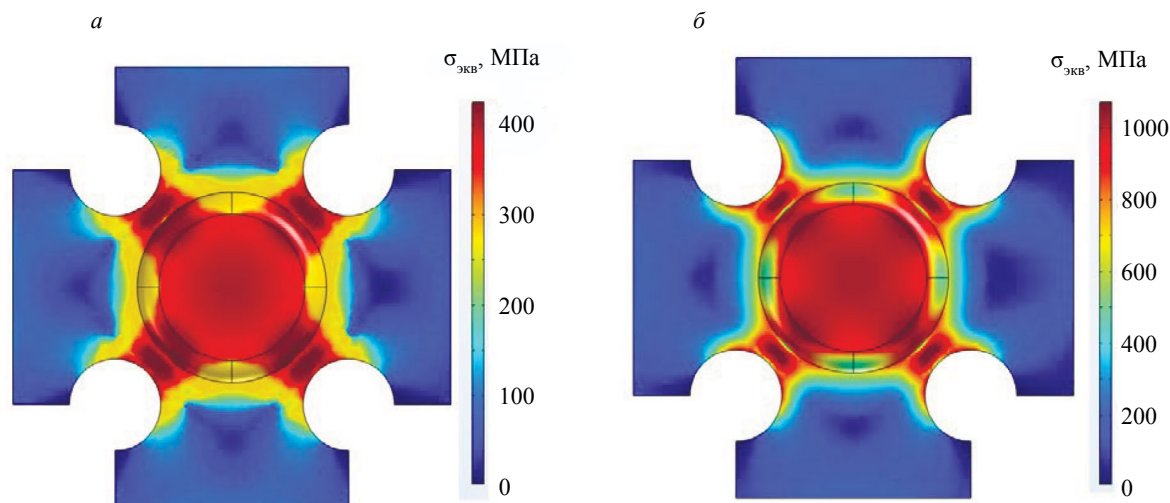


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений при двухосном растяжении стали 15 (а) и стали 12Х18Н9Т (б). Нагрузка по каждой оси — 30 кН.

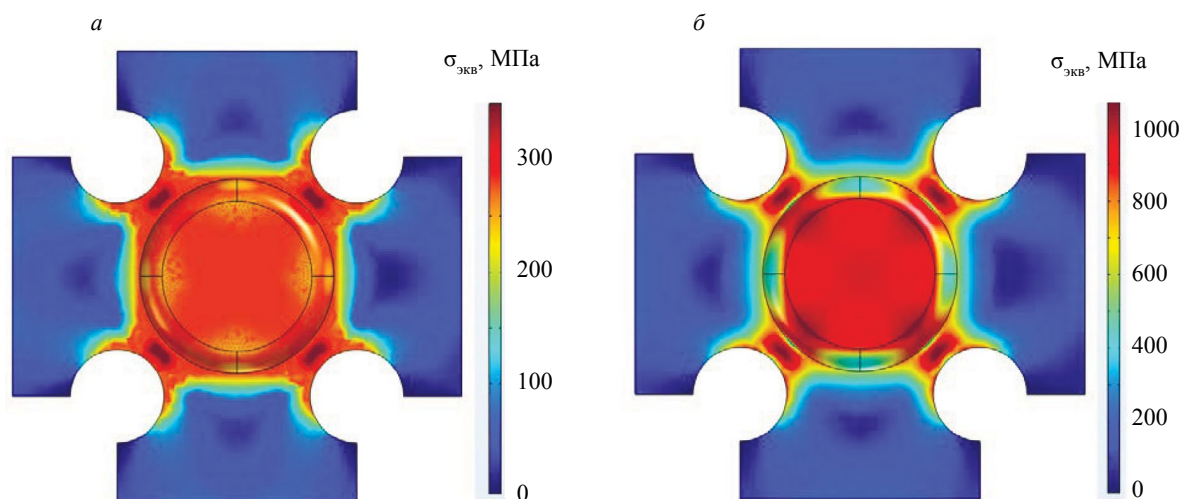


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений при двухосном растяжении составного образца (а — в слое стали 15; б — в слое стали 12Х18Н9Т). Нагрузка по каждой оси — 50 кН.

но из рис. 4, максимальные эквивалентные напряжения ориентированы под углами 45° к направлениям приложения нагрузок. При этом в центральной части образцов, где размещается ПМУ, $\sigma_{\text{экв}}$ практически одинаковы.

Результаты моделирования напряженного состояния составного образца при симметричном двухосном растяжении нагрузкой 50 кН представлены на рис. 5. Благодаря болтовому соединению головок образцов, деформация слоев равна — более прочная сталь 12Х18Н9Т препятствует пластическому деформированию слоя из стали 15. Напряжения в центральной зоне слоя стали 15 равны 280, что соответствует напряжениям на площадке текучести.

Так как напряжения в слоях различаются, на графиках в следующем разделе приводятся зависимости магнитных характеристик составного образца от величины нагрузки и степени деформации. Связь нагрузок с эквивалентными напряжениями $\sigma_{\text{экв}}$ и деформациями $\epsilon_{\text{экв}}$ центральной части составного образца и его отдельных компонент приведена в табл. 2. Как видно, в случае стали 15 максимальные эквивалентные напряжения превышают предел текучести.

Таблица 2

Связь нагрузки F по каждой из осей при симметричном двухосном растяжении с эквивалентными напряжениями $\sigma_{\text{экв}}$ и деформациями $\varepsilon_{\text{экв}}$ центральной части образцов

F , кН	Отдельные компоненты				Составной образец		
	Сталь 15		Сталь 12Х18Н9Т		$\sigma_{\text{экв}}$, МПа		$\varepsilon_{\text{экв}}$, %
	$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	$\varepsilon_{\text{экв}}$, %	$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	$\varepsilon_{\text{экв}}$, %	Сталь 15	Сталь 12Х18Н9Т	
0	0	0	0	0	0	0	0
4	120	0,06	130	0,06	60	65	0,03
6	180	0,09	200	0,10	90	95	0,04
8	240	0,12	265	0,12	120	130	0,06
10	280	0,13	330	0,15	150	165	0,08
12	290	1,00	400	0,19	180	200	0,10
14	305	2,95	465	0,25	210	230	0,11
16	315	3,44	530	0,29	240	265	0,12
18	325	3,81	600	0,32	270	295	0,14
20	340	4,45	665	0,36	280	335	0,16
22	350	4,99	735	0,41	280	395	0,19
24	360	5,58	805	0,44	280	455	0,24
26	375	6,69	870	0,51	280	510	0,28
28	385	7,68	935	0,57	280	565	0,31
30	395	8,95	1010	0,76	280	620	0,33
36	—	—	—	—	280	780	0,42
44	—	—	—	—	280	930	0,57
50	—	—	—	—	280	995	0,64

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, полученные при испытаниях отдельного слоя из стали 15 в виде полярных диаграмм, представлены на рис. 6 и 7.

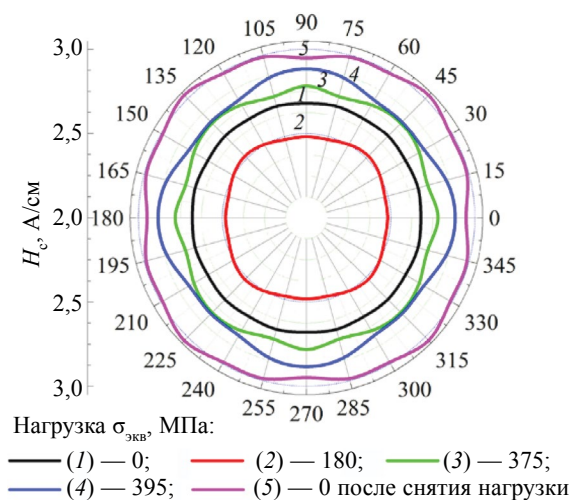


Рис. 6. Влияние симметричного двухосного растяжения на коэрцитивную силу стали 15.

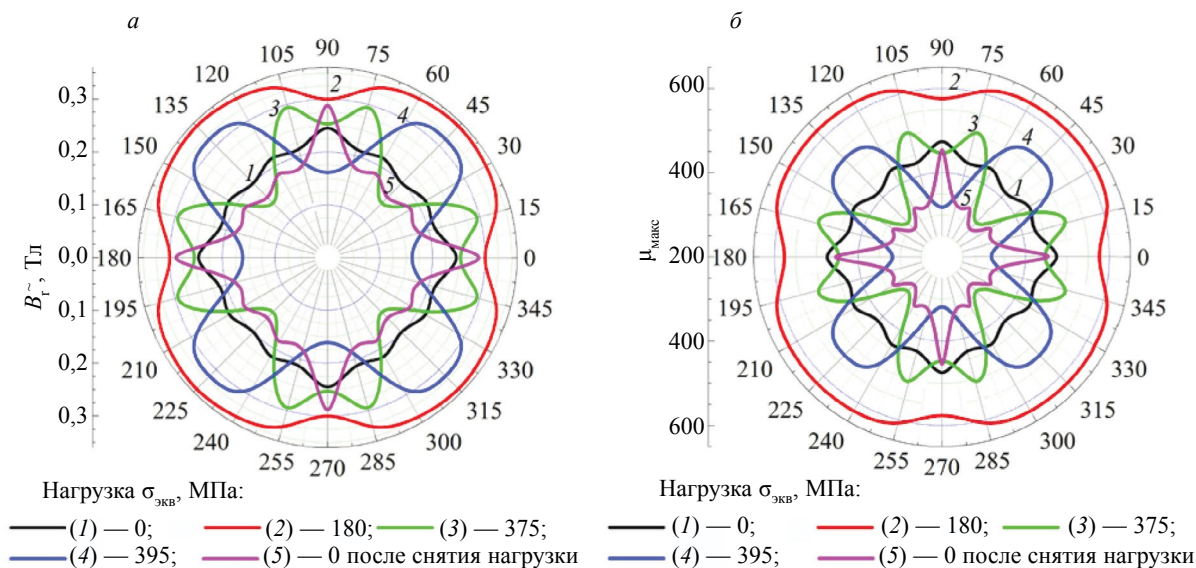


Рис. 7. Влияние симметричного двухосного растяжения на остаточную индукцию B_r (а), на максимальную относительную магнитную проницаемость (б) стали 15.

Как видно на рис. 6, в исходном состоянии стали 15 в ней отсутствует анизотропия коэрцитивной силы H_c . На начальном этапе деформирования H_c уменьшается, а затем увеличивается, что связано с особенностями проявления магнитоупругого эффекта в сталях. При дальнейшем увеличении приложенной нагрузки происходит монотонное возрастание H_c примерно на 20 % относительно минимального значения коэрцитивной силы. После снятия нагрузки коэрцитивная сила несколько возрастает, что обусловлено изменением уровня остаточных напряжений в результате пластической деформации. Следует отметить изотропию (в пределах погрешности измерений) полярных диаграмм H_c , что обусловлено следующим фактом: на эволюцию коэрцитивной силы стали соотносимое влияние оказывают нормальные и касательные напряжения [2], поэтому при измерениях в любом направлении может быть установлена корреляция коэрцитивной силы с инвариантными характеристиками напряженного состояния, например, с эквивалентными напряжениями.

Полярные диаграммы остаточной индукции B_r и максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\max}$ при различных приложенных эквивалентных напряжениях (рис. 7) качественно подобны, отличаются лишь численные значения этих параметров. На диаграммах хорошо заметна анизотропия B_r и $\mu_{\max}$ в исходном состоянии стали 15. Различие величин B_r и $\mu_{\max}$ в разных направлениях достигает 10 %, максимальные значения зафиксированы вдоль координатных осей x и y , а минимальные — под углом 45° к ним. В процессе нагружения анизотропия этих характеристик усиливается, причем неоднократно меняются направления, вдоль которых наблюдаются экстремальные значения остаточной индукции B_r и максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\max}$. При больших степенях деформации максимальные значения B_r и $\mu_{\max}$ наблюдаются в направлениях, соответствующих максимальным значениям $\sigma_{\text{экв}}$ (см. рис. 4а). После снятия нагрузки направления, вдоль которых наблюдаются максимальные и минимальные значения B_r и $\mu_{\max}$, соответствуют таковым в исходном состоянии, а анизотропия этих параметров значительно усиливается. Такое поведение B_r и $\mu_{\max}$ обусловлено, вероятно, тем, что касательные напряжения менее, чем нормальные влияют на их эволюцию.

Полярные диаграммы коэрцитивной силы холоднокатаной стали 12X18H9T при разных эквивалентных напряжениях показаны на рис. 8. Как видно, прокатка не привела к существенной анизотропии коэрцитивной силы — величина H_c при различных значениях угла α изменяется в пределах ± 1 %, т.е. существенно меньше погрешности измерения напряженности магнитного поля (3 %). Приложенные напряжения слабо влияют на величину H_c — максимальное и минимальное значения отличаются всего на 8 % ($H_c \approx 11,8$ А/см вдоль оси x при $\sigma_{\text{экв}} = 130$ МПа, а также $\sigma_{\text{экв}} = 0$ после снятия нагрузки и $H_c \approx 10,9$ А/см вдоль оси y при $\sigma_{\text{экв}} = 1010$ МПа соответственно). Вероятно, этот факт объясняется «суперпозицией» остаточных и приложенных напряжений. Можно отметить тенденцию к увеличению коэрцитивной силы вдоль направления прокатки и ее уменьшению в поперечном направлении в условиях симметричного двухосного растяжения при приближении к пределу текучести.

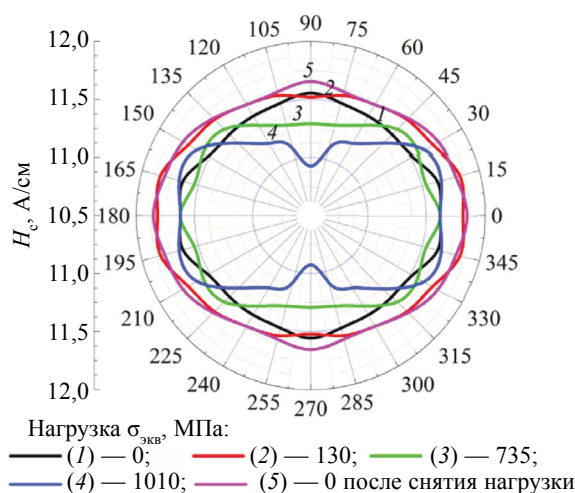


Рис. 8. Влияние симметричного двухосного растяжения на коэрцитивную силу холоднокатаной стали 12Х18Н9Т. Направление прокатки — горизонталь.

Полярная диаграмма остаточной индукции B_r стали 12Х18Н9Т в исходном состоянии (рис. 9а) тоже свидетельствует об изотропии этой характеристики, как и коэрцитивной силы. Однако в условиях двухосного растяжения проявляется анизотропия B_r — при максимальной нагрузке в направлении, поперечном прокатке, B_r на 12 % больше, чем вдоль направления прокатки. Полярная диаграмма B_r после снятия нагрузки свидетельствует об изотропии этого параметра, как и в исходном состоянии стали 12Х18Н9Т, но с несколько большей величиной.

Полярная диаграмма максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{макс}}$ стали 12Х18Н9Т в исходном состоянии (рис. 9б) имеет более сложный вид, чем аналогичные диаграммы для H_c и B_r , величина $\mu_{\text{макс}}$ вдоль направления прокатки и под углами 45° к ней заметно меньше, чем в поперечном направлении. Кроме того, имеются локальные максимумы $\mu_{\text{макс}}$ под углами примерно 25° к направлению прокатки. Полярная диаграмма $\mu_{\text{макс}}$ после снятия нагрузки имеет форму, близкую к эллипсоидальной, с короткой осью вдоль направления прокатки и длинной — в поперечном направлении.

Полярные диаграммы коэрцитивной силы составного образца «сталь 15 — сталь 12Х18Н9Т» приведены на рис. 10. Величина H_c этого образца в исходном состоянии примерно равна сред-

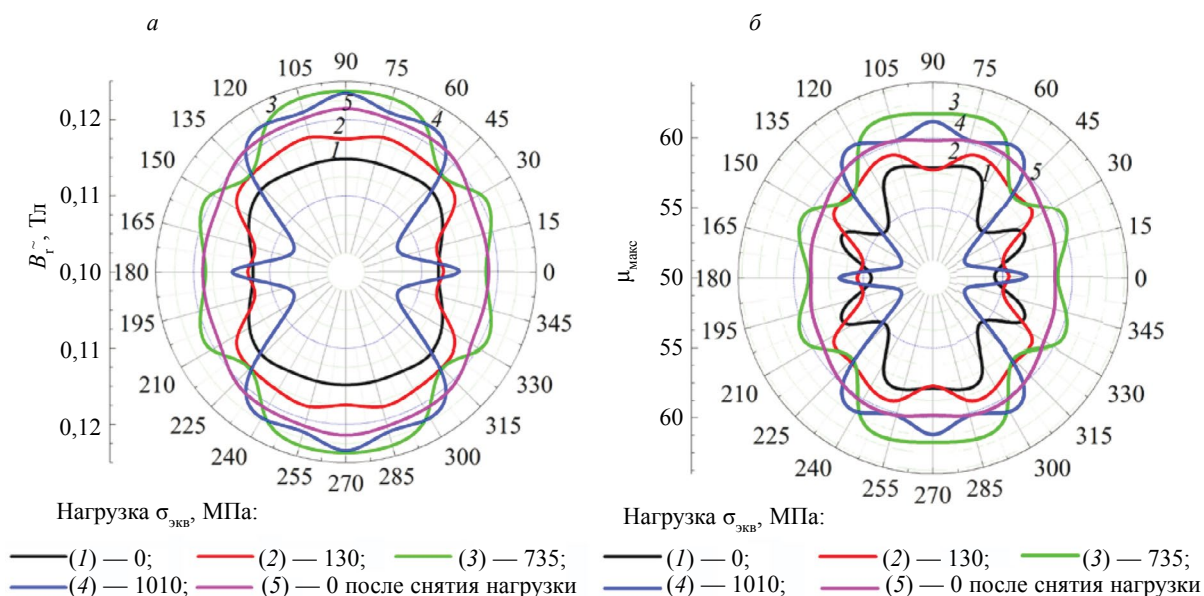


Рис. 9. Влияние симметричного двухосного растяжения на остаточную индукцию B_r холоднокатаной стали 12Х18Н9Т (а) и на максимальную относительную магнитную проницаемость (б) холоднокатаной стали 12Х18Н9Т. Направление прокатки — горизонталь.

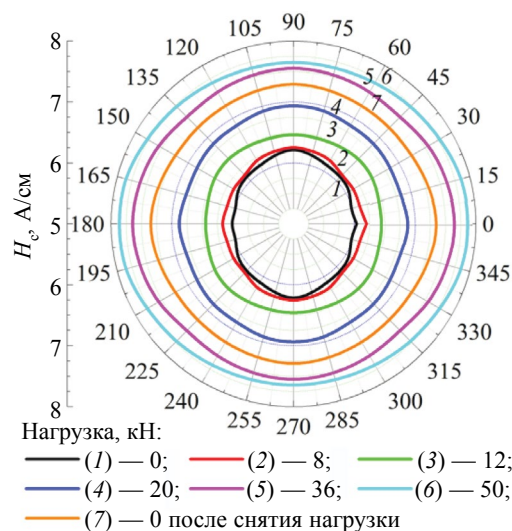


Рис. 10. Влияние симметричного двухосного растяжения на коэрцитивную силу составного материала «сталь 15 — сталь 12X18H9T». Направление прокатки стали 12X18H9T — горизонталь.

неарифметическому значению коэрцитивных сил его компонент. Но при этом зафиксирована значительная анизотропия коэрцитивной силы составного образца — величины H_c вдоль направления прокатки стали 12X18H9T и в поперечном направлении различаются примерно на 10 %. В процессе двухосного симметричного растяжения коэрцитивная сила составного образца монотонно увеличивается, а ее анизотропия исчезает, в пределах погрешности измерений H_c соответствующие полярные диаграммы имеют вид окружности (рис. 10). После снятия нагрузки с составного образца его коэрцитивная сила заметно уменьшилась по сравнению с деформированным состоянием при максимальной нагрузке, но с сохранением изотропии этого параметра. Возможно, на характер эволюции коэрцитивной силы составного образца сказывается преимущественно состояние магнитомягкой компоненты, в которой пластическая деформация начинается при существенно меньших нагрузках (см. табл. 2).

Полярные диаграммы магнитной индукции и максимальной магнитной проницаемости составного образца в исходном состоянии качественно подобны диаграмме коэрцитивной силы — минимальные значения этих характеристик наблюдаются в направлении прокатки стали 12X18H9T, максимальные — в поперечном направлении (рис. 11). В условиях двухосного растяжения анизо-

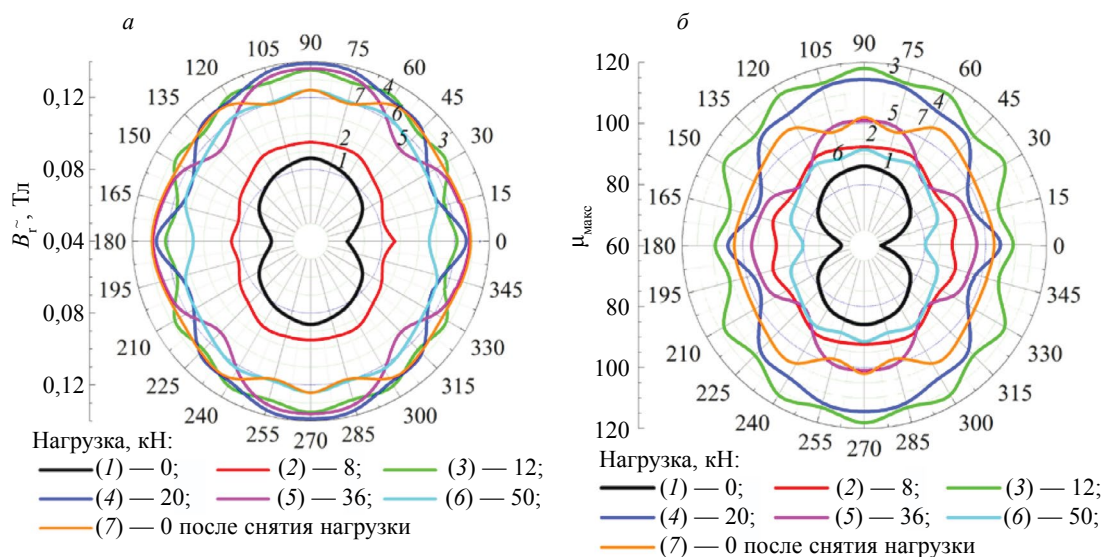


Рис. 11. Влияние симметричного двухосного растяжения на остаточную индукцию B_r (а) и максимальную относительную магнитную проницаемость (б) составного материала «сталь 15 — сталь 12X18H9T». Направление прокатки стали 12X18H9T — горизонталь.

тропия $B_r^{\sim}$ и $\mu_{\text{макс}}$ несколько уменьшается, особенно в случае остаточной индукции. После снятия нагрузки с составного образца величина $B_r^{\sim}$ примерно на том же уровне, что и под действием максимальной нагрузки, а максимальная магнитная проницаемость увеличилась в среднем примерно на 17 %. Причем после снятия нагрузки практически исчезла анизотропия $\mu_{\text{макс}}$.

Следует отметить, что в отличие от коэрцитивной силы, увеличение приложенной нагрузки слабо влияет на остаточную индукцию $B_r^{\sim}$, а максимальная магнитная проницаемость при этом изменяется немонотонно. Эти обстоятельства обуславливают неэффективность использования остаточной индукции $B_r^{\sim}$ и максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{макс}}$ для диагностики напряженного состояния исследованного образца и аналогичных по составу двухслойных материалов.

Для большей наглядности на рис. 12 показаны зависимости магнитных характеристик, приведенных к значениям в исходном состоянии до нагружения, в зависимости от степени эквивалентных деформаций для всех трех исследованных материалов (составного образца и его отдельных компонент) при ориентации магнитного поля вдоль оси x . Как видно, коэрцитивная сила составного образца демонстрирует монотонный рост значений во всем исследованном диапазоне степеней деформации (изменение составляет порядка 30 %).

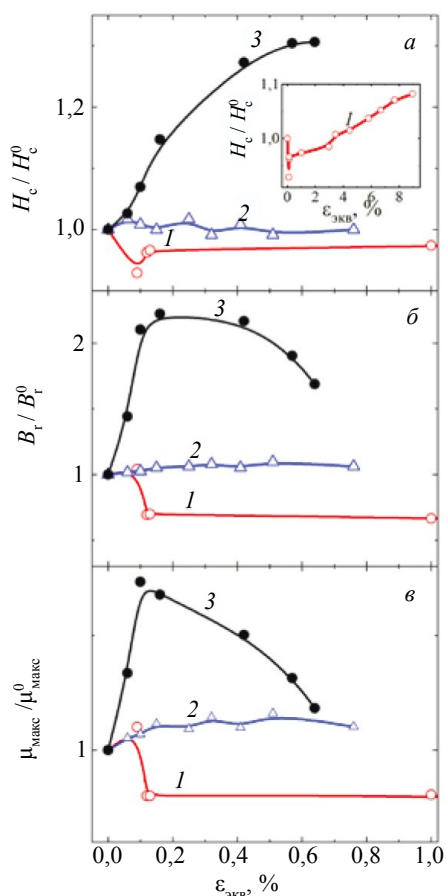


Рис. 12. Значения коэрцитивной силы H_c (а), остаточной индукции $B_r^{\sim}$ (б) и максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{макс}}$ (в), приведенные к значениям этих величин в исходном состоянии, в зависимости от степени эквивалентных деформаций. Кривые 1 — сталь 15; 2 — сталь 12Х18Н9Т; 3 — составной материал «сталь 15 — сталь 12Х18Н9Т». Угол α равен 0° .

Остаточная индукция $B_r^{\sim}$ и максимальная магнитная проницаемость $\mu_{\text{макс}}$ составного образца изменяются немонотонно, при этом максимумы величин локализуются в диапазоне деформаций 0,12—0,13 %. По-видимому, на характер изменения магнитных характеристик составного образца при степенях деформации, не превышающих 0,12 %, оказывает заметное влияние магнитотвердый слой. В то время, как при $\epsilon_{\text{экв}} > 0,13 \%$, основной вклад в формирование измеряемых магнитных характеристик составного материала вносит магнитомягкая составляющая, в кото-

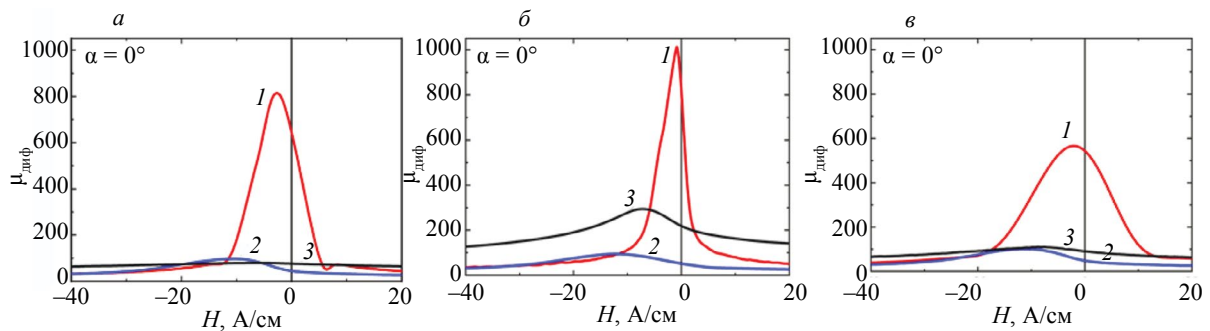


Рис. 13. Полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости при различных величинах эквивалентной степени деформации. Кривые 1 — сталь 15; 2 — сталь 12X18H9T; 3 — составной материал «сталь 15 — сталь 12X18H9T». Угол α равен 0° .

рой в диапазоне величин степени эквивалентной деформации 0,12—0,13 % начинается переход в стадию пластической деформации. Это приводит к росту коэрцитивной силы и снижению B_r и $\mu_{\text{макс}}$ как самой компоненты, так и всего двухслойного образца в целом.

На рис. 13 представлены полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ составного образца и материалов, его составляющих, при различных степенях деформации (на рис. 13а — кривые $\mu_{\text{диф}}(H)$ для трех материалов в исходном недеформированном состоянии; 13б — при степенях деформации, приблизительно равных 0,1 %; 13в — при максимальной для составного образца деформации, $\varepsilon_{\text{экв}} \approx 0,64$ %). Для отдельных компонент приведены графики со значениями деформаций, ближайших к указанным.

На каждой из кривых наблюдается один пик: на кривых 1 пики отвечает ферриту в стали 15, на кривых 2 — сформированному при прокатке мартенситу деформации в стали 12X18H9T. Поля пиков отдельных компонент соответствуют значениям их коэрцитивных сил и локализуются в полях примерно 2,7 и 11,6 А/см соответственно. Расположение пиков на кривых 3, отвечающих составному образцу, принимает промежуточное значение между аналогичными величинами отдельных компонент. По мере увеличения нагрузки появляются следующие изменения на зависимостях $\mu_{\text{диф}}(H)$ для всех трех исследованных материалов: амплитуда пика на полевой зависимости стали 15 сначала увеличивается (см. рис. 13б), а при максимальной для составного образца нагрузке ее величина уменьшается по сравнению с аналогичной величиной

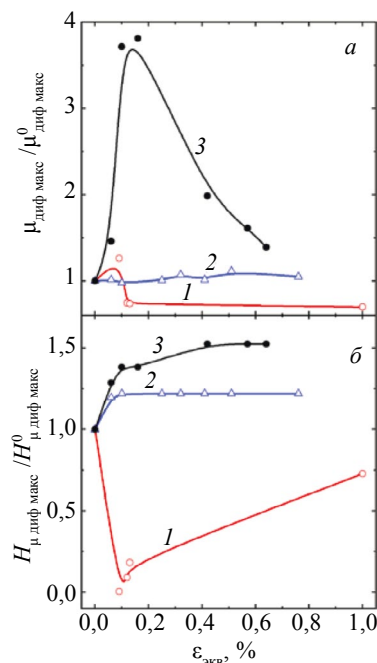


Рис. 14. Зависимости максимумов полевых зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости (а) и значений полей, в которых максимумы локализованы (б), от степени эквивалентных деформаций. Кривые 1 — сталь 15; 2 — сталь 12X18H9T; 3 — составной материал «сталь 15 — сталь 12X18H9T». Угол α равен 0° .

в исходном состоянии примерно на 28 %. При этом положение максимума дифференциальной магнитной проницаемости магнитомягкого слоя сдвигается в сторону более слабых полей. На кривых $\mu_{\text{диф}}(H)$ для образца из стали 12X18H9T величина максимума практически не изменяется.

Изменение амплитуды пиков $\mu_{\text{диф макс}}$ с ростом степени эквивалентной деформации и поля, в которых пики локализуются, приведенные к значениям в исходном состоянии, более наглядно показаны на рис. 14. Анализ поведения $\mu_{\text{диф макс}}(\epsilon_{\text{экв}})$ и $H_{\text{диф макс}}(\epsilon_{\text{экв}})$ составного образца подтверждает вывод о том, что на уровень его магнитных характеристик при $\epsilon_{\text{экв}} < 0,13\%$ влияет магнитотвердый слой, при $\epsilon_{\text{экв}} > 0,13\%$ — магнитомягкая составляющая, в которой начинается переход в пластическую область деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены испытания на упругопластическое симметричное двухосное деформирование модельного двухслойного материала, составленного из компонент с различной магнитной твердостью (магнитомягкий слой — сталь 15, магнитотвердый слой — сталь 12X18H9T, подвергнутая холодной прокатке на 50 %), а также его отдельных компонент. Определены закономерности изменения магнитных характеристик от действующих нагрузок.

Установлено, что в качестве информативного параметра для оценки изменений напряженно-деформированного состояния изделий из исследованного двухслойного материала в условиях двухосного симметричного растяжения может быть использована его коэрцитивная сила, демонстрирующая однозначный характер изменения во всем диапазоне упругопластического деформирования.

Показано, что основной вклад в формирование уровня магнитных характеристик составного материала на начальном этапе деформирования вносит магнитотвердая компонента, в дальнейшем с ростом нагрузки — магнитомягкая компонента, что связано с переходом данной составляющей в стадию пластической деформации.

Результаты представляют интерес для технической диагностики двухслойных элементов конструкций, работающих в условиях плосконапряженного состояния.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России по темам № 124020600045-0 и «Диагностика» № 122021000030-1. При выполнении работы было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин В.Н., Царькова Т.П., Ничипурук А.П., Лоскутов В.Е., Лопатин В.В., Костин К.В. Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. 2009. № 11. С. 54—67.
2. Горкунов Э.С., Мушников А.Н. Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных сталях (обзор) // Контроль. Диагностика. 2020. № 12. С. 4—23.
3. Roskosz M., Fryczowski K. Magnetic methods of characterization of active stresses in steel elements // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2020. V. 499. Art. no. 166272.
4. Perevertov O. Influence of the applied elastic tensile and compressive stress on the hysteresis curves of Fe–3%Si non-oriented steel // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. V. 428. P. 223—228. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.12.040
5. Leuning N., Steentjes S., Schulte M., Bleck W., Hameyer K. Effect of elastic and plastic tensile mechanical loading on the magnetic properties of NGO electrical steel // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2016. V. 417. P. 42—48. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.05.049
6. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Куликов В.А. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 12—20.
7. Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Путилова Е.А., Мушников А.Н., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х. Особенности поведения магнитных и акустических характеристик горячекатаной стали 08Г2Б при циклическом нагружении // Дефектоскопия. 2019. Т. 55. № 11. С. 21—31.
8. Gorkunov E.S., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Mushnikov A.N. The Effect of Cyclic Preloading on the Magnetic Behavior of the Hot-Rolled 08G2B Steel Under Elastic Uniaxial Tension // Research in Nondestructive Evaluation. 2021. V. 32. No. 6. P. 276—294. DOI: 10.1080/09349847.2021.2002487
9. Поволоцкая А.М., Мушников А.Н. Особенности поведения магнитных характеристик при упругом деформировании корпусной стали 20ГН с различным исходным напряженно-деформированным состоянием // Дефектоскопия. 2022. Т. 58. № 11. С. 32—42. DOI: DOI: 10.31857/S0130308222110045
10. Агинеи Р.В., Исламов Р.Р., Мамедова Э.А. Определение напряженно-деформированного состояния участка трубопровода под давлением по результатам измерения коэрцитивной силы // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9. № 3. С. 284—294.

11. Бердник М.М., Бердник А.Г. Перспективы применения коэрцитиметрии для оценки параметров напряженно-деформированного состояния конструкций // Технология машиностроения. 2019. № 1. С. 37—43.
12. Захаров В.А., Ульянов А.И., Горкунов Э.С. Коэрцитивная сила ферромагнитных сталей при двухосном симметричном растяжении материала // Дефектоскопия. 2011. № 6. С. 3—15.
13. Новиков В.Ф., Захаров В.А., Ульянов А.И., Сорокина С.В., Кудряшов М.Е. Влияние двухосной упругой деформации на коэрцитивную силу и локальную остаточную намагниченность конструкционных сталей // Дефектоскопия. 2010. № 7. С. 59—68.
14. Shulu Feng, Zhijiu Ai, Jian Liu, Jiayi He, Yukun Li, Qifeng Peng, Chengkun Li. Study on Coercivity-Stress Relationship of X80 Steel under Biaxial Stress // Advances in Materials Science and Engineering. 2022. V. 2022. Art. no. 2510505. DOI: 10.1155/2022/2510505
15. Yongjian Li, Shiping Song, Yu Dou, Tao Chen. Influence of tensile stress on the magnetic properties of ultra-thin grain-oriented electrical steel // AIP Advances. 2023. V. 13. Art. no. 025223. DOI: 10.1063/9.0000468
16. Langman R.A. Magnetic properties of mild steel under conditions of biaxial stress // IEEE Transactions on Magnetics. 1990. V. 26. Is. 4. P. 1246—1251.
17. Hubert O., Maazaz Z., Taurines J., Crepinge R., van den Berg F., Celada-Casero C. Influence of biaxial stress on magnetostriction — Experiments and modeling // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2023. V. 568. Art. no. 170389. DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.170389
18. Мушников А.Н., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Горюлева Л.С., Путилова Е.А. Влияние упругопластического деформирования по схеме двухосного растяжения на магнитные характеристики никеля // Дефектоскопия. 2023. Т. 59. № 11. С. 3—16.
19. Pearson J., Squire P.T., Maylin M.G., Gore J.G. Apparatus for magnetic measurements under biaxial stress // IEEE Transactions on magnetics. 2000. V. 36. Is. 5. P. 3599—3601.
20. Vengrinovich Valeriy, Vintov Dmitriy, Prudnikov Andrew, Podugolnikov Pavel, Ryabtsev Vladimir. Magnetic Barkhausen Effect in Steel under Biaxial Strain/Stress: Influence on Stress Measurement // Journal of Nondestructive Evaluation. 2019. V. 38. Art. no. 52. DOI: 10.1007/s10921-019-0576-7
21. Kai Y., Enokizono M. Effect of arbitrary shear stress on vector magnetic properties of non-oriented electrical steel sheets // IEEE Transactions on magnetics. 2017. V. 53. Is. 11. P. 2002304.
22. Kai Y., Tsuchida Y., Todaka T., Enokizono M. Influence of biaxial stress on vector magnetic properties and 2-D magnetostriction of a nonoriented electrical steel sheet under alternating magnetic flux conditions // IEEE Transactions on magnetics. 2014. V. 50. Is. 4. P. 6100204.
23. Aydin U., Rasilo P., Martin F., Belahcen A., Daniel L., Arkkio A. Modeling of multi-axial stress dependent iron losses in electrical steel sheets // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2020. V. 504. Art. no. 166612.
24. Aydin U., Martin F., Rasilo P., Belahcen A., Haavisto A., Singh D., Daniel L., Arkkio A. Rotational single sheet tester for multiaxial magneto-mechanical effects in steel sheets // IEEE Transactions on magnetics. 2019. V. 55. Is. 3. P. 2001810.
25. Митропольская С.Ю. Аттестация упрочненных поверхностных слоев магнитными и электромагнитными методами // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 3. С. 42—48.
26. Горкунов Э.С., Субачев Ю.В., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М. Влияние упругой деформации на гистерезисные свойства двуслойного ферромагнетика, составленного из компонентов, обладающих магнитострикцией разных знаков // Дефектоскопия. 2014. № 8. С. 42—56.
27. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Путилова Е.А., Поволоцкая А.М., Горюлева Л.С., Веретенникова И.А., Каманцев И.С. Использование магнитного структурно-фазового анализа для диагностики состояния композиционного материала «сталь 08Х18Н10Т — сталь Ст3» и составляющих его компонент, подвергнутых пластической деформации // Дефектоскопия. 2012. № 6. С. 30—43.
28. Gorkunov E.S. Magnetic Evaluation of the Structural and Phase Changes in Individual Layers of Multilayer Products // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2017. Is. 2. P. 6—27.
29. Mushnikov A.N., Zadvorkin S.M., Perunov E.N., Vyskrebencev S.V., Izmajlov R.F., Vichuzhanin D.I., Soboleva N.N., Igumnov A.S. Experimental Facility for Studying the Physical Properties of Materials in a Plane Stress State // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2022. Is. 4. P. 50—60.
30. Mises R.V. Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand // Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse. 1913. P. 582—592.

REFERENCES

1. Kostin V.N., Tsar'kova T.P., Loskutov V.E., Kostin K.V., Nichipuruk A.P., Lopatin V.V., Kostin K.V. Irreversible Changes in the Magnetization as Indicators of Stressed-Strained State of Ferromagnetic Objects // Defektoskopiya. 2009. No. 11. P. 54—67.
2. Gorkunov E.S., Mushnikov A.N. Magnetic methods for estimating elastic stresses in ferromagnetic steels (review) // Kontrol'. Diagn. 2020. No. 12. P. 4—23.

3. Roskosz M., Fryczowski K. Magnetic methods of characterization of active stresses in steel elements // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. V. 499. Art. no. 166272.
4. Perevertov O. Influence of the applied elastic tensile and compressive stress on the hysteresis curves of Fe-3%Si non-oriented steel // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. V. 428. P. 223—228. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.12.040
5. Leuning N., Steentjes S., Schulte M., Bleck W., Hameyer K. Effect of elastic and plastic tensile mechanical loading on the magnetic properties of NGO electrical steel // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2016. V. 417. P. 42—48. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.05.049
6. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V., Kulikov V.A. An electromagnetic-acoustic method for studying stress-strain states of rails // *Defektoskopiya*. 2016. No. 7. P. 12—20.
7. Gorkunov E.S., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Mushnikov A.N., Bazulin E.G., Vopilkin A.Kh. Some Features in the Behavior of Magnetic and Acoustic Characteristics of Hot-Rolled 08G2B Steel under Cyclic Loading // *Defektoskopiya*. 2019. No. 11. P. 21—31.
8. Gorkunov E.S., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Mushnikov A.N. The Effect of Cyclic Preloading on the Magnetic Behavior of the Hot-Rolled 08G2B Steel Under Elastic Uniaxial Tension // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2021. V. 32. No. 6. P. 276—294. DOI: 10.1080/09349847.2021.2002487
9. Mushnikov A.N., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Goruleva L.S., Putilova E.A. Effect of Elastic-Plastic Deformation by Biaxial Tension on the Magnetic Characteristics of Nickel // *Defektoskopiya*. 2023. No. 11. P. 32—42.
10. Aginey R.V., Islamov R.R., Mammadova E.A. Determination of the stress-strain state of the pipeline section under pressure based on the results of the coercive force measurement // *Nauka Tekhnol. Truboprovodn. Transp. Nefti Nefteprod.* 2019. V. 9. No. 3. P. 284—294.
11. Berdnik M.M., Berdnik A.G. Prospects for the use of coercimetry to assess the parameters of the stress-strain state of structures // *Tekhnol. Mashinostr.* 2019. No. 1. P. 37—43.
12. Zakharov V.A., Ul'yanov A.I., Gorkunov E.S. Coercive force of ferromagnetic steels under the biaxial symmetrical tension of a material // *Defektoskopiya*. 2011. No. 6. P. 3—15.
13. Novikov V.F., Sorokina S.V., Kudryashov M.E., Zakharov V.A., Ul'yanov A.I. The influence of biaxial elastic deformation on the coercive force and local remanent magnetization of construction steels // *Defektoskopiya*. 2010. No. 7. P. 59—68.
14. Shulu Feng, Zhijiu Ai, Jian Liu, Jiayi He, Yukun Li, Qifeng Peng, Chengkun Li. Study on Coercivity-Stress Relationship of X80 Steel under Biaxial Stress // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022. V. 2022. Art. no. 2510505. DOI: 10.1155/2022/2510505
15. Yongjian Li, Shiping Song, Yu Dou, Tao Chen. Influence of tensile stress on the magnetic properties of ultra-thin grain-oriented electrical steel // *AIP Advances*. 2023. V. 13. Art. no. 025223. DOI: 10.1063/9.0000468
16. Langman R.A. Magnetic properties of mild steel under conditions of biaxial stress // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1990. V. 26. Is. 4. P. 1246—1251.
17. Hubert O., Maazaz Z., Taurines J., Crepinge R., van den Berg F., Celada-Casero C. Influence of biaxial stress on magnetostriction — Experiments and modeling // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2023. V. 568. Art. no. 170389. DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.170389
18. Mushnikov A.N., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Goruleva L.S., Putilova E.A. Effect of Elastic-Plastic Deformation by Biaxial Tension on the Magnetic Characteristics of Nickel // *Defektoskopiya*. 2023. No. 11. P. 3—16.
19. Pearson J., Squire P.T., Maylin M.G., Gore J.G. Apparatus for magnetic measurements under biaxial stress // *IEEE Transactions on magnetics*. 2000. V. 36. Is. 5. P. 3599—3601.
20. Vengrinovich Valeriy, Vintov Dmitriy, Prudnikov Andrew, Podugolnikov Pavel, Ryabtsev Vladimir. Magnetic Barkhausen Effect in Steel under Biaxial Strain/Stress: Influence on Stress Measurement // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2019. V. 38. Art. no. 52. DOI: 10.1007/s10921-019-0576-7
21. Kai Y., Enokizono M. Effect of arbitrary shear stress on vector magnetic properties of non-oriented electrical steel sheets // *IEEE Transactions on magnetics*. 2017. V. 53. Is. 11. P. 2002304.
22. Kai Y., Tsuchida Y., Todaka T., Enokizono M. Influence of biaxial stress on vector magnetic properties and 2-D magnetostriction of a nonoriented electrical steel sheet under alternating magnetic flux conditions // *IEEE Transactions on magnetics*. 2014. V. 50. Is. 4. P. 6100204.
23. Aydin U., Rasilo P., Martin F., Belahcen A., Daniel L., Arkkio A. Modeling of multi-axial stress dependent iron losses in electrical steel sheets // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. V. 504. Art. no. 166612.
24. Aydin U., Martin F., Rasilo P., Belahcen A., Haavisto A., Singh D., Daniel L., Arkkio A. Rotational single sheet tester for multiaxial magneto-mechanical effects in steel sheets // *IEEE Transactions on magnetics*. 2019. V. 55. Is. 3. P. 2001810.
25. Mitropol'skaya S.Y. Certification of Hardened Surface Layers by Magnetic and Electromagnetic Methods // *Metal Science and Heat Treatment*. 2013. V. 55. No. 3—4. P. 157—162.
26. Gorkunov E.S., Subachev Y.V., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M. The influence of elastic deformations on the hysteresis properties of a two-layer ferromagnet composed of components with magnetostrictions of opposite signs // *Defektoskopiya*. 2014. No. 8. P. 42—56.

27. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Povolotskaya A.M., Goruleva L.S., Veretennikova I.A., Kamantsev I.S. The Application of Magnetic Structural Phase Analysis for the Diagnostics of the State of a 08X18H10T Steel—C 3 Steel Composite Material and Its Components That Were Subjected to Plastic Deformation // *Defektoskopiya*. 2012. No. 6. P. 30—43.

28. Gorkunov E.S. Magnetic Evaluation of the Structural and Phase Changes in Individual Layers of Multilayer Products // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2017. Is. 2. P. 6—27.

29. Mushnikov A.N., Zadvorkin S.M., Perunov E.N., Vyskrebencev S.V., Izmajlov R.F., Vichuzhanin D.I., Soboleva N.N., Igumnov A.S. Experimental Facility for Studying the Physical Properties of Materials in a Plane Stress State // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2022. Is. 4. P. 50—60.

30. Mises R.V. *Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand* // *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*. 1913. P. 582—592.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2024 г. А.А. Комарский^{1,*}, С.Р. Корженевский^{1,**}, А.В. Пономарев^{1,***},
А.С. Чепусов¹, В.В. Криницин¹, О.Д. Красный¹

¹Институт электрофизики УрО РАН, Россия 620110 Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

E-mail: *aakomarskiy@gmail.com; **korser1970@yandex.ru; ***avponomarev@ya.ru

Поступила в редакцию 29.07.2024; после доработки 08.08.2024

Принята к публикации 15.08.2024

Для детектирования близких по химическому составу и плотности веществ одним из перспективных методов неразрушающего контроля является двухэнергетическая обработка рентгеновских изображений. В частности, алгоритмы двухэнергетических преобразований могут применяться для поиска скрытых в пустой породе минералов. Метод является наиболее эффективным, когда правильно подобраны условия регистрации рентгеновских изображений и энергетические уровни. В работе проведено сравнение эффективности обработки изображений двухэнергетическим методом для трех случаев изменения спектрального состава: во-первых, в результате регулирования напряжения на рентгеновской трубке; во-вторых, при ослаблении низкоэнергетического излучения за счет применения медного фильтра; в-третьих, при комбинации данных способов. В качестве образцов для детектирования применяются частицы берилла, впрыснутые в измельченный мусковит. В работе применяется источник импульсного рентгеновского излучения, который обеспечивает генерацию импульсов излучения наносекундной длительности. Для способа регулирования энергии излучения за счет изменения пикового напряжения на рентгеновской трубке реализована оригинальная схема высоковольтного генератора. Применение рентгеновских источников данного типа обеспечивает возможность получения рентгеновских изображений движущихся объектов с высоким разрешением.

Ключевые слова: двухэнергетическая обработка изображений, импульсное рентгеновское излучение, тормозной спектр, рентгеновский детектор, сэндвич-детектор, берилл, минерал.

COMPARISON OF METHODS FOR CHANGING THE SPECTRUM OF RADIATION OF A PULSE X-RAY SOURCE TO DETERMINE THE MOST EFFECTIVE TWO-ENERGY IMAGE PROCESSING

© 2024 A.A. Komarskiy^{1,*}, S.R. Korzhenevskiy^{1,**}, A.V. Ponomarev^{1,***}, A.S. Chepusov¹,
V.V. Krinitzin¹, O.D. Krasniy¹

¹Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

Russia 620110 Yekaterinburg, Amundsen St. 106

E-mail: *aakomarskiy@gmail.com; **korser1970@yandex.ru; ***avponomarev@ya.ru

For detecting substances with similar chemical composition and density, one of the promising methods of non-destructive testing is dual-energy processing of X-ray images. In particular, dual-energy transformation algorithms can be used to search for minerals hidden within barren rock. This method is most effective when the conditions for registering X-ray images and energy levels are properly selected. This study compares the effectiveness of image processing using the dual-energy method for three cases of spectral composition variation: firstly, as a result of adjusting the voltage on the X-ray tube; secondly, by attenuating low-energy radiation through the use of a copper filter; and thirdly, by combining these two methods. Beryl particles embedded in ground muscovite are used as samples for detection. The study utilizes a pulsed X-ray radiation source that generates radiation pulses of nanosecond duration. An original high-voltage generator scheme has been implemented for the method of regulating radiation energy by changing the peak voltage on the X-ray tube. The use of X-ray sources of this type enables the acquisition of high-resolution X-ray images of moving objects.

Keywords: dual-energy image processing, pulsed X-ray radiation, bremsstrahlung spectrum, X-ray detector, sandwich detector, beryl, mineral.

DOI: 10.31857/S0130308224090044

ВВЕДЕНИЕ

Двухэнергетическая обработка рентгеновских изображений является современным методом анализа данных, полученных в результате неразрушающего контроля. Этот подход основывается на использовании двух различных энергетических спектров рентгеновского излучения и позволяет получать более детальную информацию о внутренней структуре объекта [1–4].

Двухэнергетическая обработка рентгеновских изображений может быть использована для обнаружения различных материалов, выявления дефектов и улучшения общего качества изображений. Метод применяется при диагностике различных заболеваний, а также в промышленных и научных приложениях [5—9].

Для корректировки спектрального состава применяются различные методы и их комбинации. Встречается применение двух независимых источников излучения, настроенных на разные напряжения [10]. Основная сложность заключается в том, что необходимо получить наборы данных при одинаковом оптическом ходе рентгеновских лучей через образец, т.е. необходимо полное попиксельное совпадение изображений, получаемых при разных энергиях. Используются рентгенопоглощающие фильтры, что позволяет отсечь излучение с низкой энергией. В частности, такой метод распространен в досмотровых системах, где применяют детекторы типа сэндвич [11—14]. Также встречаются детекторы, позволяющие регистрировать независимыми каналами рентгеновское излучение с разной энергией [15]. Однако такие детекторы пока применимы в ограниченных областях исследований, т.к. показывают высокую эффективность для невысоких энергий рентгеновского излучения.

В настоящее время интересной задачей является детектирование скрытых минералов в горных породах. Сложность заключается в том, что искомым объект и вмещающая порода имеют обычно близкий химический состав и плотность. На рентгеновских однопроекционных изображениях, полученных при тормозном спектре излучения, объекты практически не отличаются по контрасту. В данном случае для контрастного выделения минералов метод двухэнергетических преобразований демонстрирует свою эффективность. В наших работах, а также в работах зарубежных исследователей, показаны перспективы данного метода в этой области промышленности [16—21].

Для достижения высокой вероятности детектирования и успешного применения методов двухэнергетической обработки рентгеновских изображений на практике помимо минимизации шумов [22] необходимо учитывать несколько ключевых аспектов. Во-первых, важно обеспечить высокую резкость рентгеновских изображений объектов, которые движутся с большой скоростью, например, на конвейерной ленте. Во-вторых, следует оптимально разделить излучение по спектральному составу, чтобы повысить контраст и разрешение изображений, полученных в результате двухэнергетической обработки.

Для получения с высокой резкостью изображений движущихся объектов на высокой скорости мы в своих работах предложили использовать импульсные рентгеновские источники, основанные на полупроводниковых прерывателях тока (SOS — semiconductor opening switch) [23]. Импульсные рентгеновские источники с SOS позволяют получать мощные рентгеновские импульсы с длительностью порядка 10—50 нс при частоте следования до нескольких десятков кГц, что позволяет применять в разных научных и прикладных областях [24—26]. Мощность в одной вспышке достигает сотен МВт, что соответствует работе постоянного рентгеновского источника по времени порядка нескольких десятков мс. Высокое разрешение изображения движущегося объекта обеспечивается за счет того, что за короткую длительность рентгеновского импульса объект, движущийся со скоростью десятки метров в секунду, проходит лишь тысячные доли мм [27].

Одной из особенностей импульсных рентгеновских источников является использование двухэлектродной рентгеновской трубки с холодным катодом. В отличие от источников постоянного излучения, регулировка напряжения на рентгеновской трубке и тока в широких диапазонах для импульсных рентгеновских источников является сложной задачей. Стоит отметить, что изменение напряжения на рентгеновской трубке позволяет варьировать спектр рентгеновского излучения, что имеет важное значение при получении изображений, используемых для двухэнергетической обработки. Для изменения напряжения и, как следствие, спектрального состава излучения для импульсного рентгеновского источника в данной работе предложен метод, основанный на изменении напряжения первичного накопителя энергии, что приближает импульсный источник рентгеновского излучения по параметрам к источнику непрерывного действия с постоянным напряжением.

В данной работе проводится сравнение нескольких методов изменения спектрального состава рентгеновского излучения для получения контрастного выделения минералов на изображениях после двухэнергетической обработки. В качестве источника излучения применяется импульсный рентгеновский источник, для которого разработана система регулировки напряжения. В качестве объекта исследования применяются образцы берилла, помещенные во вмещающую породу мусковит. Эти образцы представляют не только практический, но и научный интерес, т.к. плотность и химический состав минералов и вмещающей породы имеют близкий химический состав и плотность.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для определения максимального контраста частиц берилла, скрытых в мусковите, планируется сравнить три метода изменения спектра тормозного рентгеновского излучения, полученного на импульсном рентгеновском источнике. Первый способ получения двух отличающихся спектров будет реализован путем изменения амплитуды импульса напряжения. Во втором способе изменение спектрального состава будет осуществлено за счет использования рентгенопоглощающего фильтра при неизменной амплитуде импульса напряжения. В третьем способе излучение с низкой энергией будет получено при меньшем значении напряжения, а высокоэнергетическое излучение — при большем значении напряжения и использовании фильтра для удаления низкоэнергетической составляющей. Таким образом, в третьем способе спектральный состав будет модифицирован за счет изменения амплитуды напряжения в сочетании с использованием медного рентгенопоглощающего фильтра.

Импульсный рентгеновский источник с регулировкой амплитуды напряжения

Структурная схема генератора для получения высоковольтных импульсов напряжения с использованием индуктивного накопителя энергии с полупроводниковым прерывателем тока SOS-диода представлена на рис. 1. Конденсатор C_0 в первом контуре генератора заряжается до 600 В. После подачи импульса запуска на тиристор энергия из конденсатора C_0 передается в магнитный компрессор. Магнитный компрессор представляет собой последовательность контуров с трансформаторами (в некоторых случаях с дросселями) и конденсаторами, на выходе из которого происходит существенное увеличение амплитуды импульса напряжения при уменьшении его длительности. Если амплитуда импульса после прохождения первого трансформатора составляет около 15 кВ, а длительность порядка нескольких мкс, то на выходе максимальное напряжение достигает значения 70 кВ при длительности импульса около 100 нс. Полупроводниковый прерыватель тока обеспечивает резкий обрыв тока, что создает бросок напряжения на нагрузке. Таким образом, напряжение на нагрузке достигает значения выше 140 кВ при длительности 30 нс. В зависимости от энергии, запасаемой в конденсаторе C_0 , настройки контуров магнитного компрессора и применения достаточного количества полупроводниковых прерывателей тока значение напряжения может достигать 1 МВ. Отсутствие разрядников обострителей, применяемых в большинстве промышленных импульсных рентгеновских источников, дает возможность генерировать импульсы с частотой десятки кГц [28].

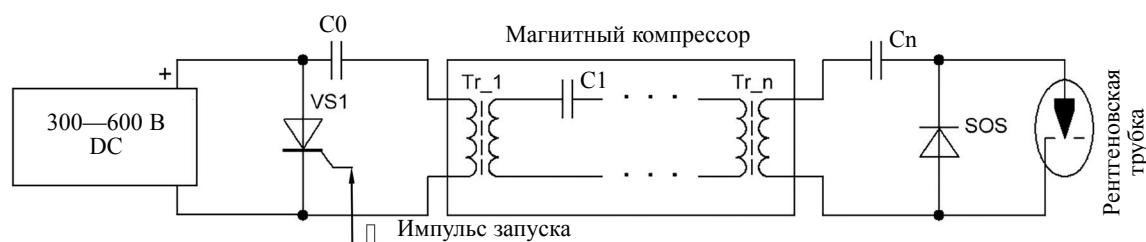


Рис. 1. Структурная схема импульсного рентгеновского источника.

Оптимальная настройка источника, применяемого в экспериментах, позволяет получить импульс напряжения на рентгеновской трубке с максимальным значением 145 кВ. Ток через трубку достигает значений 900 А. Для источников с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока нами предложена электронная регулировка амплитуды выходного импульса напряжения. Регулировка может быть обеспечена за счет уменьшения напряжения первичного накопителя и, как следствие, запасаемой в нем энергии. Это приводит к снижению амплитуды тока накачки полупроводникового прерывателя, и к снижению значения максимального напряжения на рентгеновской трубке. С помощью источника постоянного напряжения можно в режиме реального времени изменять напряжение заряда конденсатора от 300 до 600 В. Экспериментально получена зависимость изменения выходного импульса напряжения от напряжения на первичном накопителе, показанная на рис. 2.

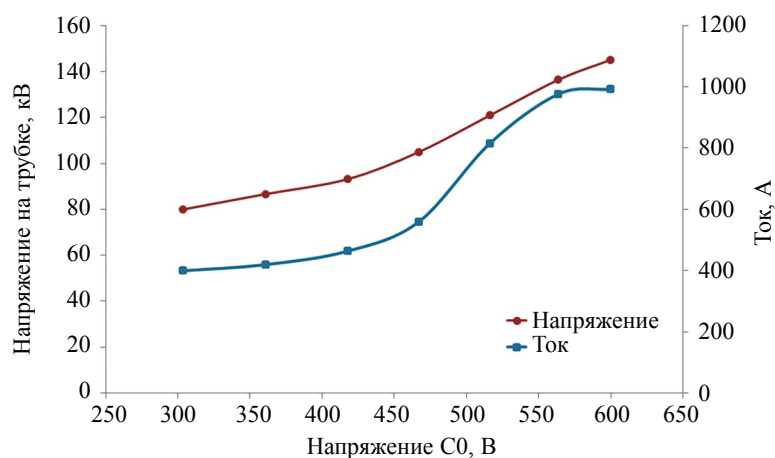


Рис. 2. Зависимость максимумов напряжений и токов импульсной рентгеновской трубки от напряжения на первичном накопителе.

При напряжениях на рентгеновской трубке ниже 100 кВ наблюдается нестабильная работа, воспроизводимость импульсов снижается. Применяются двухэлектродные импульсные рентгеновские трубки с холодным катодом. Эмиссия электронов с таких катодов происходит под воздействием высокой напряженности электрического поля [29]. Для экспериментов по получению двух отличающихся спектров излучения выбраны режимы генерации рентгеновских импульсов при максимальных значениях напряжений 145 и 105 кВ. На рис. 3 представлены соответствующие графики зависимостей импульсного тока рентгеновской трубки и импульсного напряжения на трубке от времени.

Для источника импульсного излучения с индуктивным накопителем энергии регулировка выходного импульса напряжения достигает 40 процентов от максимального значения. Это приближает импульсный источник к источникам непрерывного действия, в которых есть возможность изменять ток накала нити катода, что приводит к изменению мощности излучения, и изменять напряжение на трубке, что ведет не только к изменению мощности излучения, но спектрального состава.

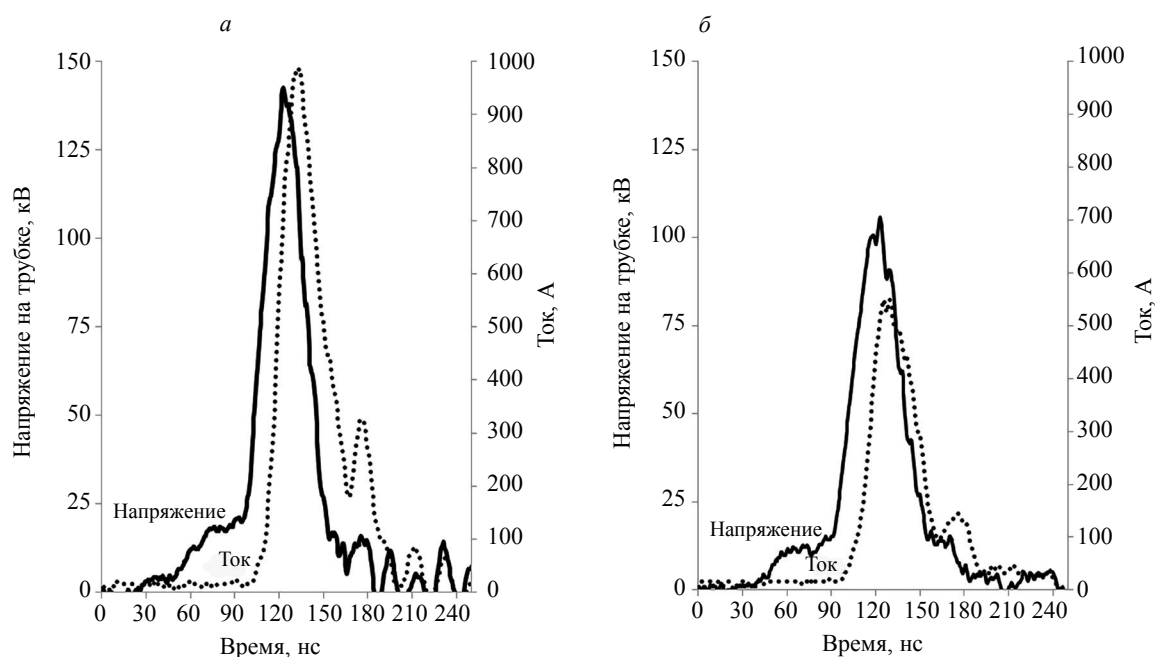


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения и тока: максимального напряжения 145 кВ (а); максимальное напряжение 105 кВ (б).

Получение двухэнергетических изображений при разных спектральных составах излучения

Двухэнергетическая обработка рентгеновских изображений зависит в большой степени от спектрального состава излучения. Необходимо получать 2 изображения, для одного из которых выше доля низкоэнергетических квантов, а для другого выше доля высокоэнергетических квантов. В идеальном случае необходимо моноэнергетическое излучение. Однако для практических целей целесообразно использовать рентгеновские источники, генерирующие излучение с непрерывным тормозным спектром.

Для данных параметров импульсов напряжения и тока рассчитаны спектры излучения. Как видно из графиков (см. рис. 2), при расчете спектра излучения импульсного рентгеновского источника необходимо учитывать изменение значений тока и напряжения от времени. Эмиссия электронов с холодного катода имеет пороговое значение, т.е. начинается, когда напряжение достигает определенных значений. За счет этих факторов спектр излучения импульсного источника имеет отличие от источника непрерывного излучения: доля квантов излучения с низкой энергией выше в случае применения источника импульсного излучения, чем при использовании источника постоянного действия при одинаковых значениях максимальных напряжений. Расчеты спектров выполнены, исходя из полученных зависимостей импульсов тока и напряжения от времени. На рис. 4 приводятся рассчитанные спектры излучения. Изменение максимального значения импульса напряжения приводит к изменению спектра импульсного источника излучения.

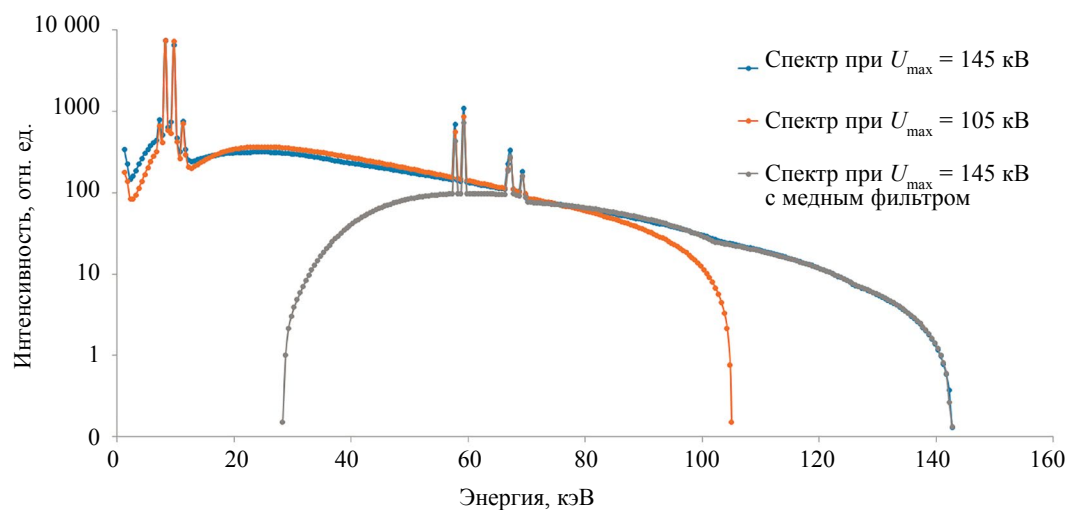


Рис. 4. Спектры излучения для импульсного рентгеновского источника при максимальном напряжении 145 кВ, 105 кВ и при напряжении 145 кВ с использованием медного фильтра.

Также приводится спектр, рассчитанный для случая, когда импульсное излучение с амплитудой напряжения 145 кВ прошло через медный фильтр толщиной 0,5 мм. В данном случае по спектру видно, что низкоэнергетическое излучение поглощается фильтром. Интенсивность приводится в относительных единицах, чтобы нагляднее представить изменение спектральных составов для данных случаев. Спектр, полученный при максимальном напряжении и с применением медного фильтра, нормирован по высокоэнергетической составляющей относительно спектра, полученного при 145 кВ без фильтра. Это позволяет показать долю отсекаемых низкоэнергетических квантов. Спектр, полученный при максимальном напряжении на трубке 105 кВ, нормирован по низкоэнергетической части спектра относительно спектра, полученного при максимальном напряжении 145 кВ без применения медного фильтра. Это позволяет показать отличие в высокоэнергетической составляющей.

Комбинации излучений данных спектральных составов выбраны для получения пар изображений и дальнейшей двухэнергетической обработки. Введем обозначения для излучений представленных спектров. Излучение, полученное без фильтров при максимальном напряжении на трубке 145 кВ ($E[145\text{kV}]$); излучение, полученное при максимальном напряжении на трубке после прохождения медного фильтра 0,5 мм ($E[145\text{kV_Cu}]$); излучение при напряже-

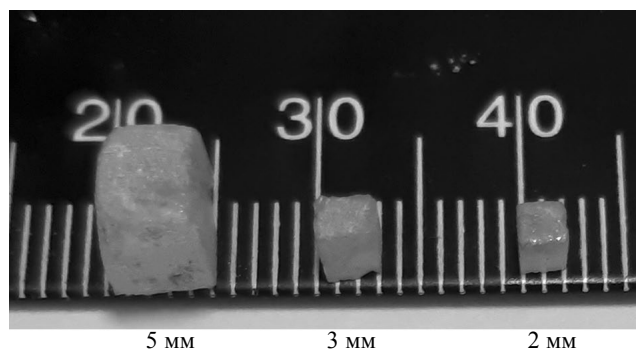


Рис. 5. Фото частиц берилла с прямоугольными гранями.

нии на рентгеновской трубке 105 кВ, полученное после снижения напряжения на конденсаторе первого контура генератора (E[105kV]).

Для исследования изготовлено две тонкостенные прямоугольные формы с полостями 5 мм, куда впрессован измельченный мусковит фракцией 0,1—1 мм с отдельными частицами мусковита размерами до 4 мм, а в одну из форм также помещены частицы берилла, близкие к кубической форме, с размерами ребер 2, 3 и 5 мм, показанные на рис. 5.

Изображения получены при излучении со спектрами, описанными выше. В качестве образцов взята как одна форма толщиной 5 мм с частицами берилла в мусковите, так и обе формы, наложенные друг на друга, в этом случае толщина составляет 10 мм.

Исходные рентгеновские проекционные изображения, полученные при данных спектральных составах, представлены на рис. 6.

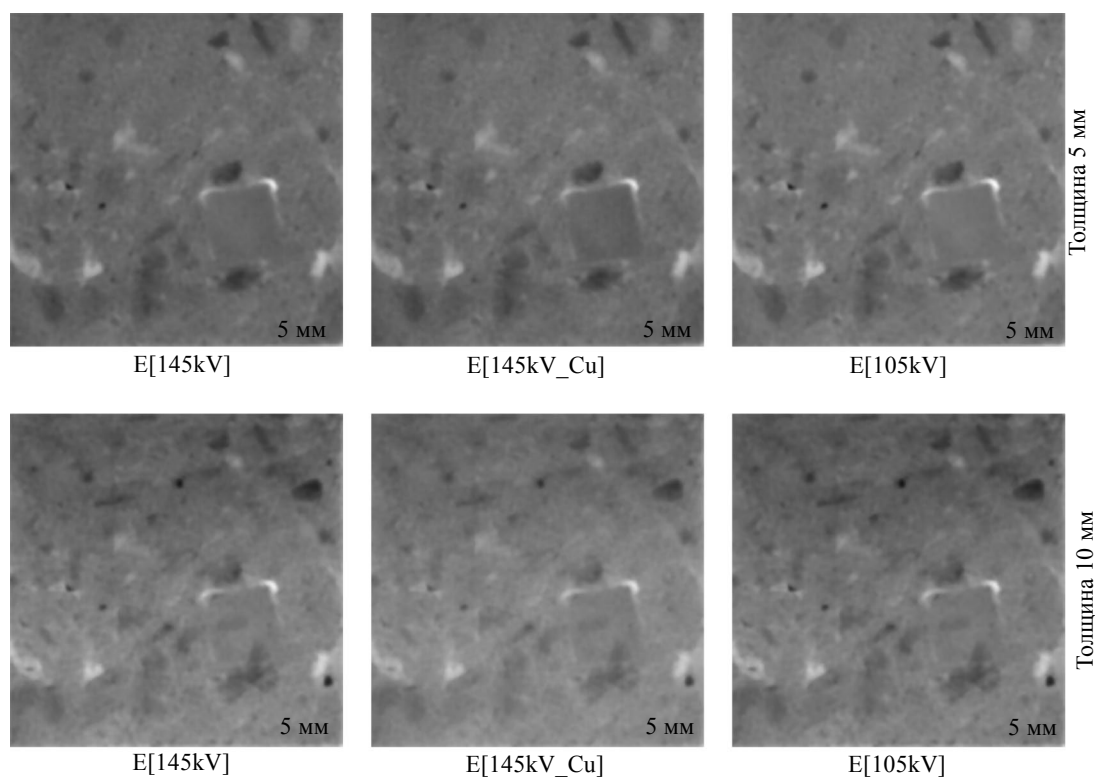


Рис. 6. Рентгеновские изображения объектов исследования, полученные при разных спектральных составах.

Дозы излучения для каждого снимка экспериментально выбраны таким образом, чтобы интенсивность засветки детектора соответствовала 2/3 от максимального значения его динами-

ческого диапазона. В качестве приемника рентгеновского излучения выбран плоскочелюстной детектор VIVIX-V 2323D с размерами 1280×1280 пикселей, который имеет сцинтиллятор CsI, размер пикселя составляет 185 мкм, АЦП — 16 бит.

Как видно из рис. 6, частицы берилла практически неразличимы на фоне измельченного мусковита. Мусковит в виде небольших частиц представляет собой темные включения на изображении. Выделяется самый большой берилл с гранью 5 мм за счет того, что вокруг него имеются пустоты, хотя значения яркости пикселей, относящихся к частицам берилла, близки к значениям яркости пикселей измельченного мусковита.

Двухэнергетические преобразования изображений, полученных при разных спектральных составах

Методы двухэнергетической обработки основаны на том, что поглощение рентгеновского излучения разными веществами зависит от энергии излучения. В данном эксперименте сложность заключается в том, что необходимо детектировать вещества, имеющие близкий химический состав, плотность и, как следствие, близкие рентгенопоглощающие свойства. Алгоритм двухэнергетической обработки, который используется в данном исследовании, описан в нашей работе [20]. Он основан на различии абсорбции рентгеновского излучения при разных энергетических спектрах. Алгоритм позволяет повысить контраст между близкими веществами с незначительным различием по атомному номеру. В результате, на обработанных изображениях вмещающая порода вне зависимости от плотности и размеров частиц имеет близкую яркость, а искомые частицы берилла контрастно выделяются на их фоне.

Для двухэнергетических преобразований выбраны пары изображений, полученных при разных спектрах, которые показаны на рис. 6. Двухэнергетическая обработка проведена независимо для образцов толщиной 5 и 10 мм (рис. 7).

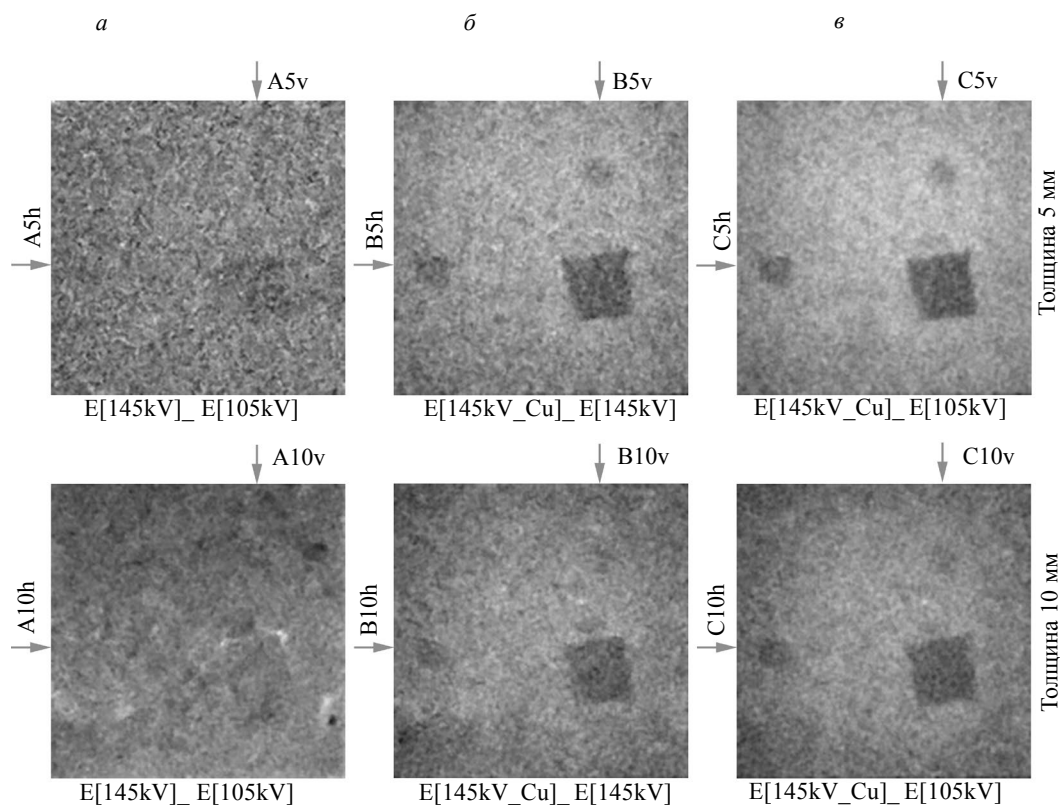


Рис. 7. Двухэнергетическая обработка при сочетании пар изображений, полученных при разных энергетических спектрах излучения. Частицы берилла проявляются как более темные включения (на изображениях имеется 3 частицы берилла, самая крупная имеет грань 5 мм, частица слева — 3 мм, частица сверху — 2 мм). В обозначениях направлений, указанных стрелками, цифра — это толщина образца (5 и 10 мм); v, h — вертикальное и горизонтальное направление соответственно, по которому получено распределение интенсивности яркости пикселей в дальнейшем.

Для первой пары выбраны изображения с высокой энергией $E[145\text{kV}]$ и низкой энергией $E[105\text{kV}]$. Результат работы алгоритма представлен на рис. 7а. Вторая пара изображений для двухэнергетической обработки выбрана при высокой энергии $E[145\text{kV_Cu}]$ и низкой энергии $E[145\text{kV}]$, т.е. при одном максимальном напряжении, но с применением фильтра, отсекающим низкоэнергетическое излучение. Обработанные изображения для толщин 5 и 10 мм показаны на рис. 7б. В качестве последней пары взяты изображения, полученные при высокой энергии излучения $E[145\text{kV_Cu}]$ и при низкой энергии $E[105\text{kV}]$. Результат работы алгоритма показан на рис. 7в.

По результатам двухэнергетической обработки визуально можно отметить, что регулировка спектрального состава, выполненная только за счет изменения максимального напряжения на рентгеновской трубке, дает наихудший результат: при толщине образца 5 мм из трех частиц низкий контраст имеет только частица берилла 5 мм, другие частицы не проявляются (см. рис. 7а сверху), для толщины 10 мм все частицы берилла неразличимы (см. рис. 7а снизу). Для двух других методов разделения спектрального состава при толщине образца 5 мм все частицы берилла с гранями 2, 3, 5 мм имеют значительный контраст относительно вмещающей породы (см. рис. 7б, 7в сверху), при толщине образца 10 мм контраст частиц берилла ухудшается, частица с размером грани 2 мм практически неразличима с фоном (см. рис. 7б снизу).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнения методов получения двухэнергетических изображений проведено на основе оценки контраста частиц берилла относительно мусковита разного фракционного состава и плотности. Для двухэнергетических изображений построены профили распределения интенсивности вдоль направлений, указанных стрелками на рис. 7. По изображениям видно, что имеется градиент распределения яркости, т.е. центральная часть изображений имеет более светлую область относительно периферии. При построении профилей интенсивности это учтено.

На рис. 8 представлены профили распределения интенсивности пикселей для обработанных при разных спектрах излучения изображений толщиной 5 мм.

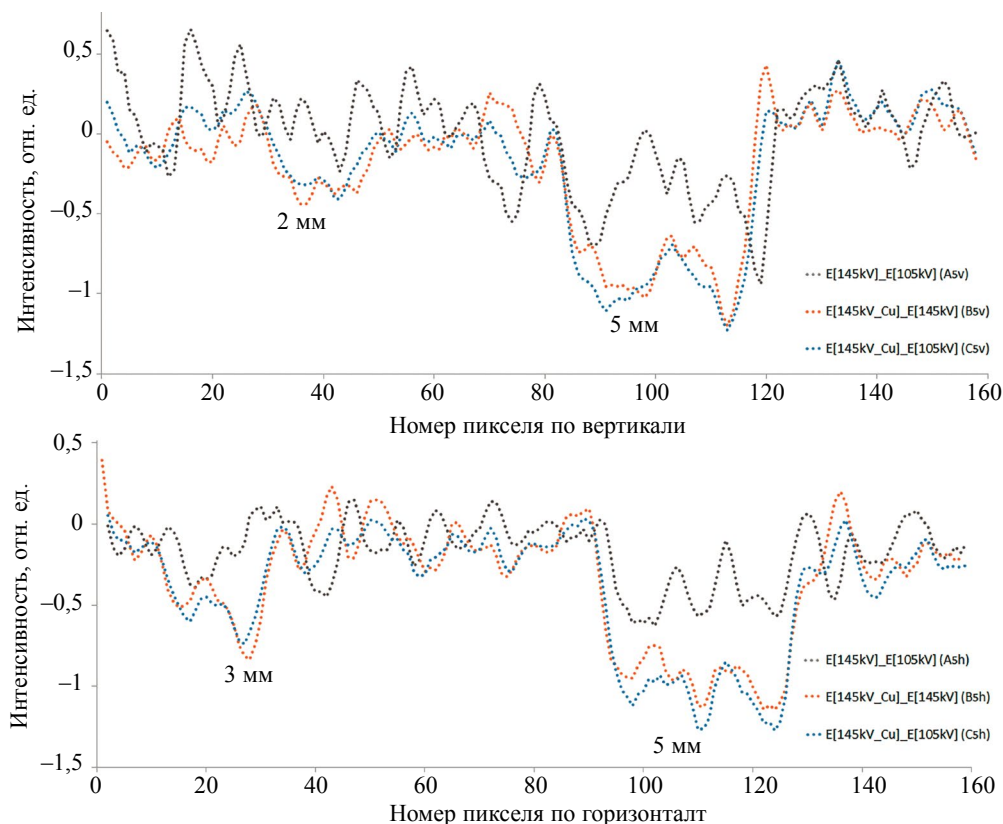


Рис. 8. Профили интенсивности пикселей двухэнергетических изображений для образца толщиной 5 мм, направления распределений показаны стрелками на рис. 7 сверху; 2, 3 и 5 мм — это размеры граней частиц, которые попали в профили распределений.

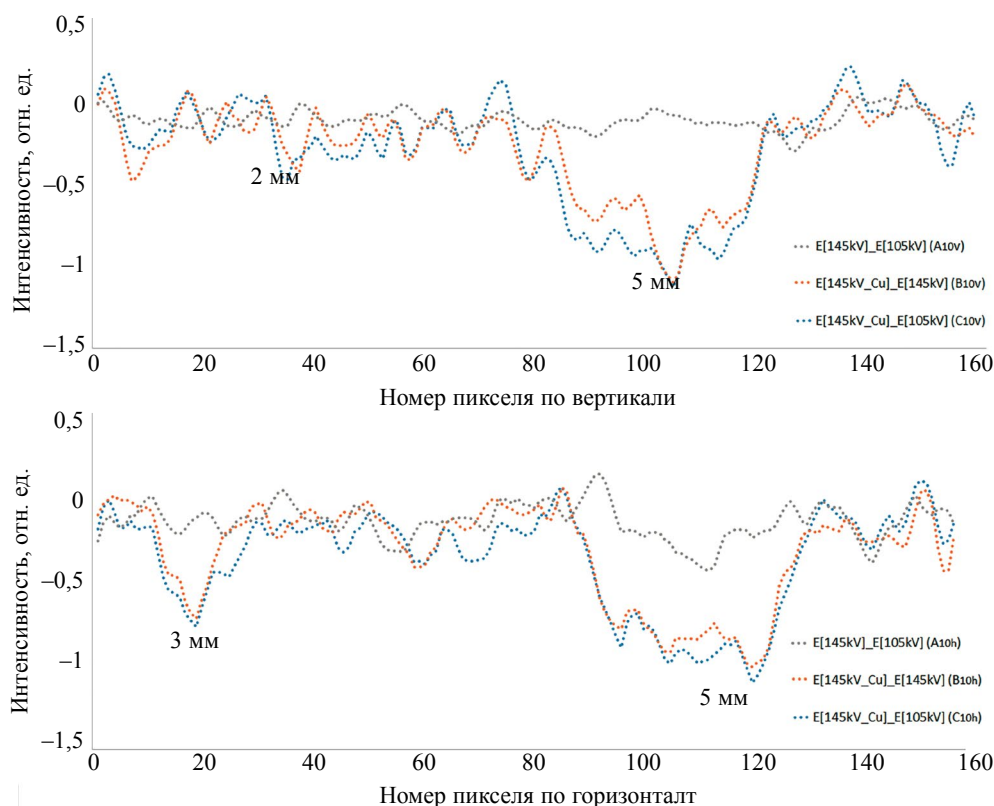


Рис. 9. Профили интенсивности пикселей двухэнергетических изображений для образца толщиной 10 мм, направления распределений показаны стрелками на рис. 7 снизу; 2, 3 и 5 мм — это размеры граней частиц берилла, которые попали в профили распределений.

В распределения интенсивности пикселей вдоль вертикальных направлений, обозначенных на рис. 7 стрелками A5v, B5v, C5v, попадают частицы берилла с размерами граней 2 и 5 мм. В распределения интенсивностей пикселей вдоль горизонтальных направлений, обозначенных на рис. 7 стрелками A5h, B5h, C5h, попадают частицы берилла с размерами граней 3 и 5 мм.

На рис. 9 представлены профили распределения интенсивности для обработанных изображений при разных спектрах излучения для образцов толщиной 10 мм. Профили построены по аналогии с рис. 8 вдоль вертикальных и горизонтальных направлений, обозначенных стрелками A10v, B10v, C10v (вертикальные направления) и A10h, B10h, C10h (горизонтальные направления) на рис. 7.

Интенсивность показана в относительных единицах, по графикам сложно сделать однозначный вывод, какой метод изменения спектрального состава наиболее эффективен при двухэнергетической обработки. Очевидно, что худшим является метод, когда спектры разделяются только за счет изменения максимального напряжения на трубке.

Для точной оценки найдены отношения сигнал/шум SNR по следующей формуле:

$$\text{SNR} = \frac{I_s^2}{I_n^2}, \quad (1)$$

где I_s — среднеквадратичное значение интенсивности сигнала; I_n — среднеквадратичное значение интенсивности шума.

Результаты расчетов SNR для трех способов изменения спектрального состава представлены в табл. 1.

По результатам, указанным в табл. 1, можно заметить, что для образца толщиной 5 мм отношение значений сигнал/шум выше, чем для образца толщиной 10 мм. Это вполне объяснимо тем, что отношение искомого вещества относительно толщины объекта исследования также выше для образца толщиной 5 мм.

Стоит отметить, что для образца толщиной 5 мм частица берилла с размером грани 2 мм имеет больший контраст на обработанном двухэнергетическом изображении, полученном

при изменении спектра только за счет применения медного фильтра ($E[145_Cu_E[145]]$), $SNR = 4,4$, тогда как при корректировке спектра за счет использования медного фильтра и изменения напряжения на трубке ($E[145_Cu_E[105]]$) контраст оказался ниже, а $SNR = 3,5$. Для частицы берилла с размером грани 3 мм при этих двух методах наблюдается меньшее отличие в контрасте: $SNR = 10,4$ при $E[145_Cu_E[145]]$, $SNR = 9,9$ при $E[145_Cu_E[105]]$. Для крупной частицы с гранью 5 мм контраст уже выше на изображении, полученном при регулировке спектров за счет применения фильтра и изменения напряжения на трубке: $SNR = 32,7$ при $E[145_Cu_E[105]]$, тогда как $SNR = 24,2$ при спектрах $E[145_Cu_E[145]]$. На двухэнергетическом изображении, полученном в результате обработки снимков, когда изменение спектра излучения основано только на регулировке напряжения на рентгеновской трубке, частицы берилла малоконтрастны, интенсивность близка к шуму. Различима только частица размером 5 мм в образце толщиной 5 мм, $SNR = 3,5$, слабый контраст можно заметить визуально на рис. 7 (верхнее изображение слева).

При толщине образца 10 мм для всех размеров частиц берилла наблюдается наиболее высокий контраст для двухэнергетических изображений, полученных в результате изменения спектров с помощью регулировки амплитуды импульса напряжения и применения медного фильтра. Для детектирования мелких частиц при толщине образца 10 мм приемлем только метод двухэнергетической обработки изображений, полученных при двух спектрах излучения: низкая энергия при напряжении на трубке 105 кВ, высокая энергия при напряжении на трубке 145 кВ и с установленным медным фильтром.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успешно реализован метод изменения напряжения на импульсном рентгеновском источнике с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока за счет изменения напряжения на первичном накопителе энергии. Регулировка напряжения на первичном накопителе приводит к изменению максимального напряжения в пределах от 105 до 145 кВ. Это позволяет получать разный спектральный состав тормозного рентгеновского излучения, что является важнейшим параметром при двухэнергетической обработке рентгеновских изображений. В свою очередь, применение импульсных рентгеновских источников может позволить повысить разрешение изображений, получаемых в том числе для двухэнергетической обработки, т.к. за наносекундную длительность импульса движущийся объект проходит крайне малое расстояние, и в таком случае его можно считать практически неподвижным. Реализация регулировки напряжения приближает параметры импульсного рентгеновского источника к источнику непрерывного действия.

Проведено сравнение методов изменения спектрального состава излучения для получения максимального контраста при двухэнергетической обработке для объектов с близким составом и плотностью. Получение излучения высокой и низкой энергий для детектирования частиц берилла во вмещающей породе методом двухэнергетической обработки осуществлено тремя способами. В первом способе низкая энергия получена при максимуме напряжения на рентгеновской трубке 105 кВ, высокая энергия получена при максимальном напряжении на трубке 145 кВ. Во втором способе максимальное напряжение на трубке составляет 145 кВ, низкоэнергетическое излучение получено без фильтра, высокоэнергетическое излучение получено при использовании рентгенопоглощающего медного фильтра 0,5 мм. В третьем случае низкая энергия получена при максимальном напряжении на рентгеновской трубке 105 кВ без применения фильтров, а высокая энергия получена при максимальном напряжении 145 кВ и применении медного фильтра 0,5 мм.

Общий вывод можно сделать следующий, несмотря на то, что разделение энергий наиболее эффективно происходит, когда низкая энергия излучения получена при максимальном напряжении на трубке 105 кВ, а высокая — при напряжении 145 кВ и применении медного фильтра, контраст частиц берилла с размером 2—3 мм в образце толщиной 5 мм оказывается выше при двухэнергетической обработке для метода разделения энергий только за счет фильтрации рентгеновского излучения при максимальном напряжении 145 кВ. Для больших толщин объекта исследования метод изменения напряжения и использования рентгенопоглощающего фильтра является эффективнее. В некоторых случаях разделение спектров получают за счет изменения напряжения на рентгеновской трубке. Однако эксперименты показывают, что этот метод оказывается малоэффективным для веществ с близкими рентгенопоглощающими свойствами. Он может быть применим только в ограниченных случаях, например, для контрастирования материалов, значительно отличающихся по плотности и атомным номерам, таких как костная структура и мягкие ткани. Эти результаты подтверждаются расчетом SNR для частиц берилла, введенных в породу мусковит, данные приведены в табл. 1.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-10013); <https://rscf.ru/en/project/22-79-10013>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blake G.M., Fogelman I. Technical principles of dual energy X-ray absorptiometry // *Seminars in Nuclear Medicine*. 1997. V. 27. No. 3. P. 210—228. DOI: 10.1016/S0001-2998(97)80025-6
2. Ramos R.M.L., Arman J.A., Galeano N.A., Hernandez A.M., Gomez J.M.G., Molinero J.G. Dual energy X-ray absorptiometry: Fundamentals, methodology, and clinical applications // *Radiología (English Edition)*. 2012. V. 54. No. 5. P. 410—423. DOI: 10.1016/j.rxeng.2011.09.005
3. Rebuffel V., Dinten J.M. Dual-energy X-ray imaging: benefits and limits. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2007. V. 49. P. 589—594. DOI: 10.1784/insi.2007.49.10.589
4. Johnson T.R. Dual-energy CT: general principles // *American Journal of Roentgenology*. 2012. V. 199. No. 5. P. 3—8. DOI: 10.2214/AJR.12.9116
5. Abbasi S., Mohammadzadeh M., Zamzamin M. A novel dual high-energy X-ray imaging method for materials discrimination // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2019. V. 930. P. 82—86. DOI: 10.1016/j.nima.2019.03.064
6. Kanno I., Yamashita Y., Kimura M., Inoue F. Effective atomic number measurement with energy-resolved X-ray computed tomography // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2015. V. 787. P. 121—124. DOI: 10.1016/j.nima.2014.11.072
7. Iovea M., Neagu M., Dului O.G., Oaie G., Szobotka S., Mateiasi G. A Dedicated on-board dual-energy computer tomograph // *J. Nondestruct. Eval.* 2011. V. 30. P. 164—171. DOI: 10.1007/s10921-011-0104-x
8. Komarskiy A.A., Korzhenevskiy S.R., Komarov N.A. Detection of plastic articles behind metal layers of variable thickness on dual-energy X-ray images using artificial neural networks // *AIP Conf. Proc.* 2023. V. 2726. No. 1. P. 020012. DOI: 10.1063/5.0134249
9. Yalçın O., Reyhancan İ.A. Detection of explosive materials in dual-energy X-Ray security systems // *Nuclear Inst. And Methods in Physics Research. A*. 2022. V. 1040. No. 1. P. 167265. DOI: 10.1016/j.nima.2022.167265
10. Li B., Yadava G., Hsieh J. Quantification of head and body CTDI(VOL) of dual-energy x-ray CT with fast-kVp switching // *Medical Physics*. 2011. V. 38. No. 5. P. 2595—2601. DOI: 10.1118/1.3582701
11. Alvarez R.E. Invertibility of the dual energy x-ray data transform // *Medical Physics*. 2019. V. 46. No. 1. P. 93—103. DOI: 10.1002/mp.13255
12. Udod V.A., Osipov S.P., Nazarenko S.Yu. Algorithm for Optimizing the Parameters of Sandwich X-ray Detectors // *X-ray Methods*. 2023. V. 59. P. 359—373. DOI: 10.1134/S1061830923700298
13. Osipov S.P., Udod V.A., Wang Y. Identification of materials in X-Ray inspections of objects by the dual-energy method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017. V. 53. No. 8. P. 568—587. DOI: 10.1134/S1061830917080058
14. Macdonald R. Design and implementation of a dual-energy X-ray imaging system for organic material detection in an airport security application // *Proceedings of the SPIE*. 2001. V. 4301. P. 31—41. DOI: 10.1117/12.420922
15. Rosenfeld A., Alnaghy S., Petasecca M., Cutajar D., Lerch M., Pospisil S., Giacometti V., Schulte R., Rosso V., Würfl M., Granja C., Martišiková M., Parodi K. Medipix detectors in radiation therapy for advanced quality-assurance // *Radiation Measurements*. 2020. V. 130. P. 106211. DOI: 10.1016/j.radmeas.2019.106211
16. Bauer C., Wagner R., Orberger B., Firsching M., Ennen A., Pina C.G., Wagner C., Honarmand M., Nabatian G., Monsef I. Potential of Dual and Multi Energy XRT and CT Analyses on Iron Formations // *Sensors*. 2021. V. 21. P. 2455. DOI: 10.3390/s21072455
17. Tonai S., Kubo Y., Tsang M.Y., Bowden S., Ide K., Hirose T., Kamiya N., Yamamoto Y., Yang K., Yamada Y. A New Method for Quality Control of Geological Cores by X-Ray Computed Tomography: Application in IODP Expedition 370 // *Frontiers in Earth Science*. 2019. V. 7. P. 1—13. DOI: 10.3389/feart.2019.00117
18. Ghorbani Y., Becker M., Petersen J., Morar S.H., Mainza A., Franzidis J.-P. Use of X-ray computed tomography to investigate crack distribution and mineral dissemination in sphalerite ore particles // *Minerals Engineering*. 2011. V. 24. No. 12. P. 1249—1257. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.04.008
19. Zhang Yi.R., Yoon N., Holuszko M.E. Assessment of Sortability Using a Dual-Energy X-ray Transmission System for Studied Sulphide Ore // *Minerals*. 2021. V. 11. No. 5. P. 490. DOI: 10.3390/min11050490
20. Komarskiy A., Korzhenevskiy S., Ponomarev A., Chepusov A. Dual-Energy Processing of X-ray Images of Beryl in Muscovite Obtained Using Pulsed X-ray Sources // *Sensors*. 2023. V. 23. No. 9. P. 4393. DOI: 10.3390/s23094393
21. Firsching M., Bauer C., Wagner R., Ennen A., Ahsan A., Kampmann T.C., Tiu G., Valencia A., Casali A., Atenas M.G. REWO-SORT Sensor Fusion for Enhanced Ore Sorting: A Project Overview / In *Proceedings of the Procemin-Geomet Conference 2019. Chile*. 2019. P. 1—9.
22. Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y. Estimating the influence of quantum noises on the quality of material identification by the dual-energy method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54. No. 8. P. 585—600. DOI: 10.1134/S1061830918080077

23. *Rukin S.N., Tsyranov S.N.* Subnanosecond breakage of current in high-power semiconductor switches // *Technical Physics Letters*. 2000. V. 26. No. 9. P. 824—826. DOI: 10.1134/1.1315507
24. *Korzhenevsky S.R., Bessonova V.A., Komarsky A.A., Motovilov V.A., Chepusov A.S.* Selection of electrohydraulic grinding parameters for quartz ore // *Journal of Mining Science*. 2016. V. 52. No. 3. P. 493—496. DOI: 10.1134/S1062739116030706
25. *Rukin S.N.* Pulsed power technology based on semiconductor opening switches: A review // *Review of Scientific Instruments*. 2020. V. 91. No. 1. P. 011501. DOI: 10.1063/1.5128297
26. *Komarskii A.A., Baiankin S.N., Mozharova I.E., Kuznetsov V.L., Korzhenevskii S.R.* Use of diagnostic nanosecond X-ray pulse apparatuses // *Vestnik rentgenologii i radiologii*. 2015. V. 2. P. 42—46.
27. *Komarskiy A.A., Korzhenevskiy S.R., Ponomarev A.V., Komarov N.A.* Pulsed X-ray source with the pulse duration of 50ns and the peak power of 70MW for capturing moving objects. // *Journal of X-Ray Science and Technology*. 2021. V. 29. No. 4. P. 567—576. DOI: 10.3233/XST-210873
28. *Vasil'ev P.V., Lyubutin S.K., Pedos M.S., Ponomarev A.V., Rukin S.N., Slovikovskii B.G., Timoshenkov S.P., Cholakh S.O.* A nanosecond SOS generator with a 20-kHz pulse repetition rate // *Instrum. Exp. Tech.* 2010. V. 53. P. 830—835. DOI: 10.1134/s0020441210060114
29. *Chepusov A., Komarskiy A., Kuznetsov V.* The influence of ion bombardment on emission properties of carbon materials // *Applied Surface Science*. 2014. V. 306. P. 94—97. DOI: 10.1007/s10812-013-9747-y
-

МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ НА ИЗГИБ ОБРАЗЦОВ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 10X18N10T

© 2024 г. А.В. Кочнев^{1,*}, М.Б. Ригмант¹, М.К. Корх¹, Н.В. Гордеев¹, А.М. Матосян¹

*¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18
E-mail: *kochnevav@imp.uran.ru*

Поступила в редакцию 30.05.2024; после доработки 17.06.2024
Принята к публикации 18.06.2024

Проведены циклические испытания на изгиб образцов из аустенитной хромоникелевой стали 10X18N10T. Изменения относительной магнитной проницаемости во время испытаний показали, что при разрушении материала происходит значительный рост данного параметра, связанный с образованием мартенсита деформации в месте крепления образца, которое испытывает максимальные напряжения при нагрузке. Дополнительный эксперимент показал, что образование мартенсита начинается до непосредственного разрушения.

Ключевые слова: относительная магнитная проницаемость, аустенитная сталь, мартенсит деформации, магнитный фазовый анализ, циклические испытания на изгиб.

MONITORING OF RELATIVE MAGNETIC PERMEABILITY VARIATION DURING CYCLIC BENDING TESTING OF AUSTENITIC STEEL GRADE 10KH18N10T SAMPLES

© 2024 A.V. Kochnev^{1,*}, M.B. Rigmant¹, M.K. Korkh¹, N.V. Gordeev¹, A.M. Matosyan¹

*¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of UB RAS,
Russia 620108, Yekaterinburg, Sofia Kovalevskaya st., 18
E-mail: *kochnevav@imp.uran.ru*

Cyclic bending testing of austenitic chromium-nickel steel grade 10Kh18N10T samples was carried out. Evaluation of relative magnetic permeability showed its noticeable increase when the samples became fractured. This increase is related to deformation martensite appearance. Additional experiment showed, that deformation martensite formation starts before the actual destruction of the sample.

Keywords: relative magnetic permeability, austenitic steel, deformation martensite, magnetic phase analysis, cyclic bending testing.

DOI: 10.31857/S0130308224090054

ВВЕДЕНИЕ

Аустенитные стали являются классом материалов, которые широко используются для конструкций ответственного назначения, обладающих повышенной коррозионной стойкостью, жаропрочностью и пластичностью. Аустенит метастабилен, поэтому в ходе эксплуатации в результате воздействия различного рода нагрузок фазовый состав данных сталей может меняться вследствие фазового перехода аустенит — мартенсит деформации. Образование мартенсита влечет за собой снижение пластичности и коррозионной стойкости [1] стали, что в дальнейшем может служить причиной ее разрушения. В связи с этим интересно рассмотреть, как циклические нагрузки влияют на образование мартенсита деформации и свойства аустенитной стали, а также оценить возможность обнаружения по магнитным свойствам зон предразрушения материала, в которых происходит накопление мартенсита деформации.

Исследования нержавеющей сталей на усталостную прочность достаточно хорошо представлены в литературе, где описаны как теоретические выкладки [2], так и различные варианты циклических деформаций: от переменных одноосных нагрузок растяжения сжатия [3], изгиба [4] до испытаний на фреттинг-усталость [5]. Однако авторам этих работ обычно интересны только механические свойства металла, в то время как вопросы фазовых превращений в них не затрагиваются. Тем не менее, в работах [6, 7] рассматривалось приложение ультразвуковых и вихретоковых методов для слежения за содержанием мартенсита, однако там не была рассмотрена возможность применения магнитных методов контроля фазового состава.

Так как при изгибе в сталях такого класса может образовываться очень малое количество мартенсита деформации (менее 1 %), информативным параметром при контроле является от-

носительная магнитная проницаемость (μ), которая чувствительна даже к малым изменениям магнитных свойств [8].

Таким образом, целью данной работы было исследование изменения μ образцов из аустенитной хромоникелевой стали во время и после циклических испытаний на изгиб.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе были исследованы образцы из аустенитной хромоникелевой стали. Химический состав стали приведен в табл. 1. Размеры образцов: $2 \times 8 \times 100$ мм.

Таблица 1

Химический состав аустенитной хромоникелевой стали

C	Si	P	S	Cr	Ni	Mn	Ti	Fe
0,094	0,59	0,020	0,013	17,19	9,83	1,21	0,58	ост.

Образцы были вырезаны на электроэрозионном станке, так как данная технология резки не допускает фазовых переходов аустенит — мартенсит в металле.

Исследования проводились на специальной лабораторной установке для циклических испытаний на изгиб. Образец закрепляется по консольной схеме, где один его конец жестко зафиксирован, а к свободному концу прикладывается усилие, приводящее к изгибу образца. Рабочая длина (длина колеблющегося участка) — 79 мм. Прилагаемая нагрузка варьировалась путем изменения амплитуды отклонения образца от нейтрального положения (значения приведены в табл. 2).

Таблица 2

Режимы циклирования образцов

Образец, №	1	2	3	4	5	6	7	8
Амплитуда колебаний, мм	5,37	5,7	5,7	6,0	6,0	6,0	7,0	8,3

Для измерения μ вблизи от места крепления (на расстояние 65—69 мм от свободного конца) образца устанавливался первичный преобразователь лабораторного прибора «ФерроКОМ-ПАС», являющегося собственной разработкой авторов статьи. Сигнал с датчика поступал на прибор и далее через АЦП L-Card E14-140 на ПК, где записывался лог-файл программой Powergraph. Начальная величина μ образцов составила 1,003. Образцы № 2 и 8 после изготовления подвергались ручной шлифовке, в результате чего их μ выросла до значений 1,012 и 1,006 соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для образцов 1—6 были сняты зависимости изменения μ от количества циклов непосредственно в процессе испытаний, примеры которых представлены на рис. 1.

Как видно из рисунка, в конце испытания происходит резкое возрастание параметра μ , связанное с образованием мартенсита деформации.

Согласно эпюре напряжений, при консольном закреплении максимальные напряжения объект испытывает в месте зажима, вследствие чего разрушение образца происходит именно в данной области. Кроме того, в месте излома образуется наибольшее количество мартенсита, что приводит к росту μ . На рис. 2 показано распределение величины μ по длине образца от свободного конца до места излома.

Как видно из графика, μ образцов не меняется практически по всей их длине. Значительные изменения μ наблюдаются по мере приближения к месту разрушения, где произошел фазовый переход аустенит — мартенсит деформации. С уменьшением нагрузки (амплитуды изгиба) величина μ падает, так как в месте излома образуется меньшее количество мартенсита деформации.

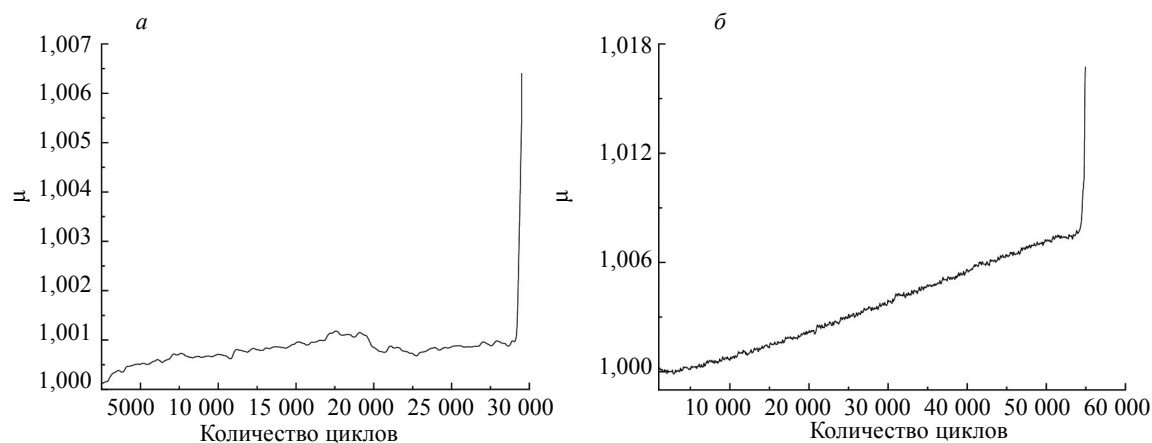


Рис. 1. Зависимость относительной магнитной проницаемости от количества циклов: образец № 6 (а); образец № 3 (б).

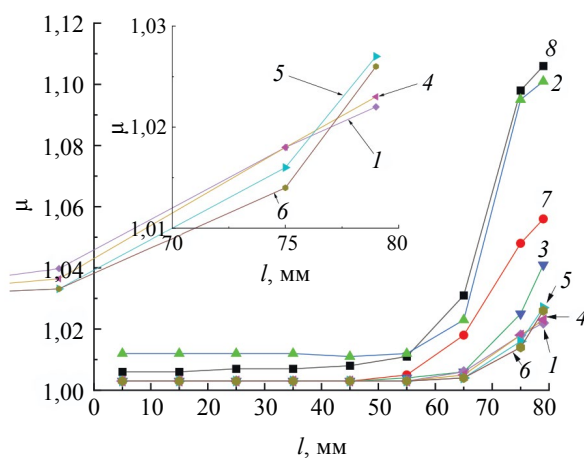


Рис. 2. Изменение относительной магнитной проницаемости по длине образца после испытаний на изгиб; l — расстояние от свободного конца образца.

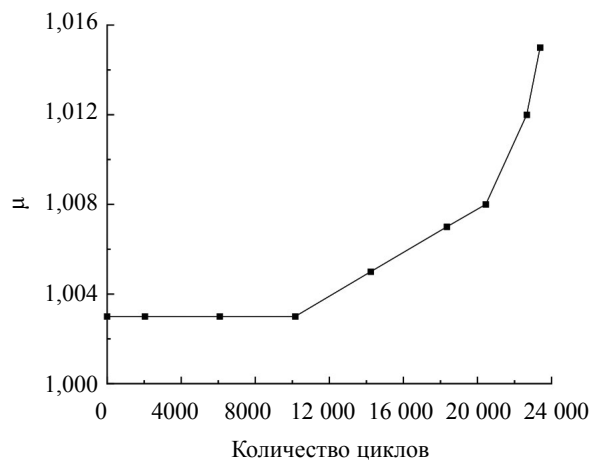


Рис. 3. Изменение относительной магнитной проницаемости в месте закрепления образца в процессе циклирования.

На результат испытаний также в значительной степени влияет подготовка поверхности образцов. После разрушения в зоне излома μ образцов № 2 и 8, подвергавшихся предварительной шлифовке, значительно превысила μ нешлифованных образцов и составила 1,101 и 1,106 соответственно.

Во время циклирования невозможно измерение μ непосредственно в зоне, испытывающей максимальные нагрузки, т.к. она располагается в месте крепления образца в держателе установки. Поэтому был сделан отдельный эксперимент для наблюдения за образованием мартенсита деформации непосредственно в месте будущего разрушения. Для этого образец в процессе циклирования периодически вынимался из установки, после чего проводилось измерение μ в области максимальной нагрузки, амплитуда изгиба составляла 6 мм. После измерения μ образец помещался обратно в установку для продолжения испытаний. Зависимость величины μ от количества циклов представлена на рис. 3.

После десяти тысяч циклов в месте крепления начинается рост μ , т.е. можно говорить о начале образования мартенсита деформации. После двадцати тысяч циклов рост становится более резким и заканчивается разрушением образца.

ВЫВОДЫ

Проведены исследования по мониторингу изменения относительной магнитной проницаемости (μ) образцов из аустенитной хромоникелевой стали при циклических испытаниях на изгиб. Показано, что при разрушении образца наблюдается резкое увеличение μ в месте излома, связанное с образованием мартенсита деформации.

Исследования также показали, что образование мартенсита деформации в зоне, испытывающей максимальные напряжения, начинается задолго до разрушения образца. Использование μ в качестве информативного параметра позволяет определить такие зоны и выявить таким образом места, в которых произойдет разрушение материала.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнеев А.Е., Харина И.Л. Влияние деформационного мартенсита на свойства аустенитной стали 316L // Тяжелое машиностроение. 2014. № 11—12. С. 14—20.
2. Шанявский А.А., Солдатенков А.П. Новые парадигмы в описании усталости металлов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 1. С. 196—207.
3. Puchi-Cabrera E.S., Staia M.H., Tovar C., Ochoa-Pérez E.A. High cycle fatigue of 316L stainless steel // International Journal of Fatigue. 2008. V. 30. P. 2140—2146.
4. Berns H., Gavriljuk V.G., Nabiran N., Petrov Yu.N., Riedner S., Trophimova L.N. Fatigue and Structural Changes of High Interstitial Stainless Austenitic Steels // Steel Research International. 2010. V. 81. P. 299—307.
5. Farrahi G.H., Minaii K., Bahai H. Fretting fatigue behavior of 316L stainless steel under combined loading conditions // International Journal of Fatigue. 2019. V. 128. P. 105206.
6. Mishakin V., Gonchar A., Kurashkin K., Kachanov M. Prediction of fatigue life of metastable austenitic steel by a combination of acoustic and eddy current data // International Journal of Fatigue. 2020. V. 141. P. 105846.
7. Мишакин В.В., Гончар А.В., Курашкин К.В., Ключников В.А., Аносов М.С. Мониторинг усталостного разрушения силового элемента конструкции вихретоковым и акустическим методами // Вестник научно-технического развития. 2021. № 162. С. 46—54.
8. Ригмант М.Б. Методы и средства контроля фазового состава двух- и трехфазных аустенитных сталей // Дефектоскопия. 2018. № 2. С. 27—40.

REFERENCES

1. Korneev A.E., Kharina I.L. Vliyanie deformatsionnogo martensita na svoistva austenitnoi stali 316L // Tyazhyoloe mashinostroenie. 2014. № 11—12. P. 14—20.
2. Shanyavskii A.A., Soldatenkov A.P. Novye paradigmy v opisaniі ustalosti metallov // Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universtiteta. Mekhanika. 2019. № 1. P. 196—207.
3. Puchi-Cabrera E.S., Staia M.H., Tovar C., Ochoa-Pérez E.A. High cycle fatigue of 316L stainless steel // International Journal of Fatigue. 2008. V. 30. P. 2140—2146.
4. Berns H., Gavriljuk V.G., Nabiran N., Petrov Yu.N., Riedner S., Trophimova L.N. Fatigue and Structural Changes of High Interstitial Stainless Austenitic Steels // Steel Research International. 2010. V. 81. P. 299—307.
5. Farrahi G.H., Minaii K., Bahai H. Fretting fatigue behavior of 316L stainless steel under combined loading conditions // International Journal of Fatigue. 2019. V. 128. P. 105206.

6. *Mishakin V., Gonchar A., Kurashkin K., Kachanov M.* Prediction of fatigue life of metastable austenitic steel by a combination of acoustic and eddy current data // *International Journal of Fatigue*. 2020. V. 141. P. 105846.

7. *Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A., Anosov M.S.* Monitoring ustalostnogo razrusheniya silovogo elementa konstruktsii vikhretokovym i akusticheskimi metodami // *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*. 2021. № 162. P. 46—54.

8. *Rigmant M.B.* Metody i sredstva kontrolya fazovogo sostava dvukh- i tryokhfaznykh austenitnykh stalei // *Defektoskopiya*. 2018. № 2. P. 27—40.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ТЕРМООБРАБОТАННОЙ СТАЛИ 38ХС НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЕМ

© 2024 г. А.М. Матосян^{1,2,*}, А.П. Ничипурук¹, А.Н. Сташков¹, Е.Ю. Сажина¹,
Н.В. Гордеев^{1,2}, С.В. Афанасьев¹

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19
E-mail: *matosian01@gmail.com

Поступила в редакцию 31.05.2024; после доработки 28.06.2024

Принята к публикации 28.06.2024

Установлено, что в отличие от отожженной малоуглеродистой стали, для конструкционной стали 38ХС на полевых зависимостях дифференциальной магнитной восприимчивости $\chi_d(H)$ особенности в виде перегиба и второго максимума появляются только для образцов с $\varepsilon=4\%$ и температурами отпуска 650 и 700 °С. Отсутствие таких особенностей на кривых $\chi_d(H)$ для образцов с $\varepsilon = 2\%$ и $T_{\text{отп}} < 650$ °С по всей вероятности связано с высоким уровнем хаотично распределенных внутренних напряжений, оставшихся после термообработки и не позволяющим сформировать после пластической деформации растяжением магнитную текстуру типа «легкая плоскость».

Ключевые слова: конструкционная легированная сталь, закалка, отпуск, холодная пластическая деформация, остаточные механические напряжения, магнитные свойства, дифференциальная магнитная восприимчивость, магнитная текстура типа «легкая плоскость».

CHARACTERISTIC OF THE CHANGES IN MAGNETIC PROPERTIES OF HEAT-TREATED STEEL AT THE EARLY STAGES OF COLD PLASTIC DEFORMATION BY TENSILE STRAIN

© 2024 А.М. Matosyan^{1,2,*}, А.Р. Nichipuruk¹, А.Н. Stashkov¹, Е.Ю. Sazhina¹,
N.V. Gordeev^{1,2}, S.V. Afanasiev¹

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
Russia 620108 Yekaterinburg, S. Kovalevskaya str. 18, Russia

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Russia 620002 Yekaterinburg, Mira str. 19, Russia
E-mail: *matosian01@gmail.com

The present work establishes alloy steel 38KhS exhibits distinct features such as an inflection point and a second peak in the field dependencies of differential magnetic susceptibility only in samples with $\varepsilon = 4\%$ and tempering temperatures of 650 and 700 °C, unlike annealed low-carbon steel. The absence of such characteristics on the $\chi_d(H)$ curves for samples with $\varepsilon = 2\%$ and $T_{\text{temp}} < 650$ °C is likely due to the high level of randomly distributed internal stresses remaining after heat treatment. These stresses prevent the formation of an «easy plane» magnetic texture after plastic deformation by stretching.

Keywords: structural alloy steel, hardening, tempering, cold plastic deformation, residual mechanical stresses, magnetic properties, differential magnetic susceptibility, magnetic texture of «light plane» type.

DOI: 10.31857/S0130308224090059

ВВЕДЕНИЕ

Конструкционная легированная сталь 38ХС используется для изготовления деталей с высокими требованиями к прочности и износостойкости — шестерни, валы, пальцы, муфты, впускные клапаны двигателей [1]. В процессе изготовления для придания стальным деталям требуемого сочетания механических свойств они подвергаются закалке и последующему отпуску в диапазоне температур от 450 до 700 °С [2]. Механические и магнитные свойства термообработанной стали 38ХС известны и хорошо изучены на сегодняшний день [3, 4]. Например, известно, что коэрцитивная сила стали 38ХС практически не изменяется в интервале температур отпуска 600—700 °С, что затрудняет неразрушающий контроль с помощью коэрцитиметров. Контроль качества деталей из стали 38ХС при высокотемпературном отпуске проводят по начальной магнитной проницаемости, имеющей локальный минимум в районе 600—650 °С [4]. В работе [5] было установлено, что в стали 38ХС, по данным рентгеноструктурного анализа, а

также по результатам магнитных измерений и металлографических исследований, с увеличением температуры отпуска до 550 °С внутренние напряжения уменьшаются. Дальнейшее увеличение температуры отпуска приводит к росту напряжений, локальный максимум которых наблюдается при 650 °С. При нагреве от 650 до 750 °С напряжения уменьшаются. Такое изменение напряженного состояния не соответствует общепринятым представлениям, согласно которым с увеличением температуры отпуска напряжения в углеродистой стали должны уменьшаться.

Известно, что холодная пластическая деформация растяжением предварительно отожженных образцов малоуглеродистой стали приводит к возникновению магнитной текстуры типа «легкая плоскость» (после снятия внешней нагрузки) [6], перпендикулярной направлению предварительного растяжения. На полевых зависимостях дифференциальной и обратимой магнитной проницаемостей возникают перегибы или дополнительные максимумы [7—9]. Однако остается невыясненным вопрос, всегда ли возникает в пластически деформированных образцах стали 38ХС наведенная деформацией магнитная текстура и как она влияет на магнитные свойства? Как будут конкурировать между собой остаточные механические напряжения, вызванные термической обработкой, стали (хаотично распределенные в поликристалле) и холодной пластической деформацией (вызванные действием внешней силы, приложенной в одном из направлений).

Целью данной работы является установление влияния холодной пластической деформации растяжением предварительно закаленных и отпущенных при разных температурах образцов из стали 38ХС на ее магнитные свойства.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Образцы в количестве 12 штук из стали 38ХС в форме параллелепипедов с исходными размерами 10×10×65 мм подвергались закалке от 900 °С в масло и последующему отпуску при температурах 500, 600, 650, 700 °С. После термообработки образцы утонялись до 4 мм и подвергались пластической деформации растяжением ($\varepsilon = 2; 4\%$) в испытательной машине Instron 5982. Измерение магнитных свойств проводилось в средней части образцов на установке Remagraph C-500. Проведено дифференцирование петель магнитного гистерезиса и построены полевые зависимости дифференциальной магнитной восприимчивости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1а представлены зависимости коэрцитивной силы от температуры отпуска для образцов без деформации ($\varepsilon = 0$), а также для образцов с относительным удлинением 2 и 4 %. С увеличением ε коэрцитивная сила увеличивается во всем исследованном диапазоне температур отпуска, что свидетельствует об увеличении остаточных механических напряжений.

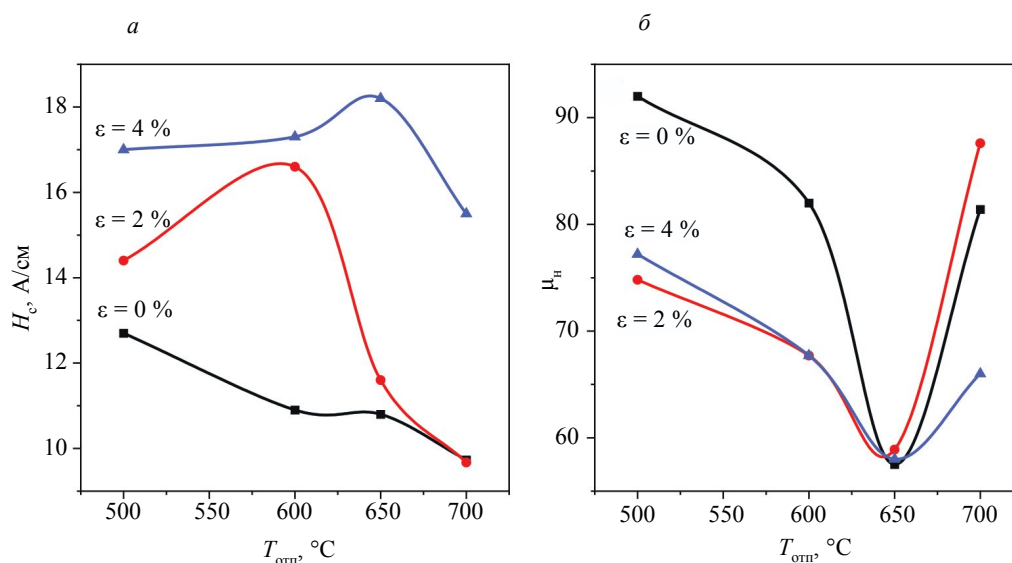


Рис. 1. Зависимости коэрцитивной силы (а) и начальной магнитной проницаемости (б) от температуры отпуска исходных и пластически деформированных образцов из стали 38ХС с относительными удлинениями 0, 2 и 4 %.

Однако характер изменения коэрцитивной силы в зависимости от температуры отпуска для недеформированных и подвергнутых деформационному воздействию образцов различен: для недеформированных образцов H_c монотонно уменьшается с увеличением $T_{отп}$, а для пластически деформированных образцов на зависимостях $H_c(T_{отп})$ имеются локальные максимумы в районе 600 °С для образца с $\varepsilon = 2\%$ и в районе 650 °С для образца с $\varepsilon = 4\%$ (см. рис. 1а). Характер изменения начальной магнитной проницаемости μ_n от $T_{отп}$ не меняется с увеличением ε — как для недеформированного ($\varepsilon = 0$), так и для пластически деформированных образцов на зависимостях $\mu_n(T_{отп})$ наблюдаются минимумы в районе 650 °С (см. рис. 1б). Деформация приводит к уменьшению значений μ_n для всех $T_{отп}$, за исключением $T_{отп} = 650$ °С, где пластическая деформация не приводит к сколько бы то ни было существенному его изменению. Именно в районе $T_{отп} = 650$ °С у недеформированных образцов из стали 38ХС наблюдается локальный максимум внутренних микронапряжений, определенный в работе [5] по данным рентгеноструктурного анализа. По всей вероятности, после небольших пластических деформаций ($\varepsilon \leq 4\%$) высокий уровень внутренних микронапряжений (хаотично распределенных) в закаленных и отпущенных образцах из стали 38ХС остается.

На рис. 2 приведены полевые зависимости дифференциальной магнитной восприимчивости $\chi_d(H)$ для недеформированных и пластически деформированных образцов из стали 38ХС. Кривые $\chi_d(H)$ для недеформированных закаленных и отпущенных образцов имеют единственный максимум в районе коэрцитивной силы. Пластическая деформация приводит к кардинальному изменению кривых. Из рис. 2 видно, что для образцов с удлинением 2 % хотя и визуально различим единственный максимум, его амплитуда становится существенно меньше и наблюдается

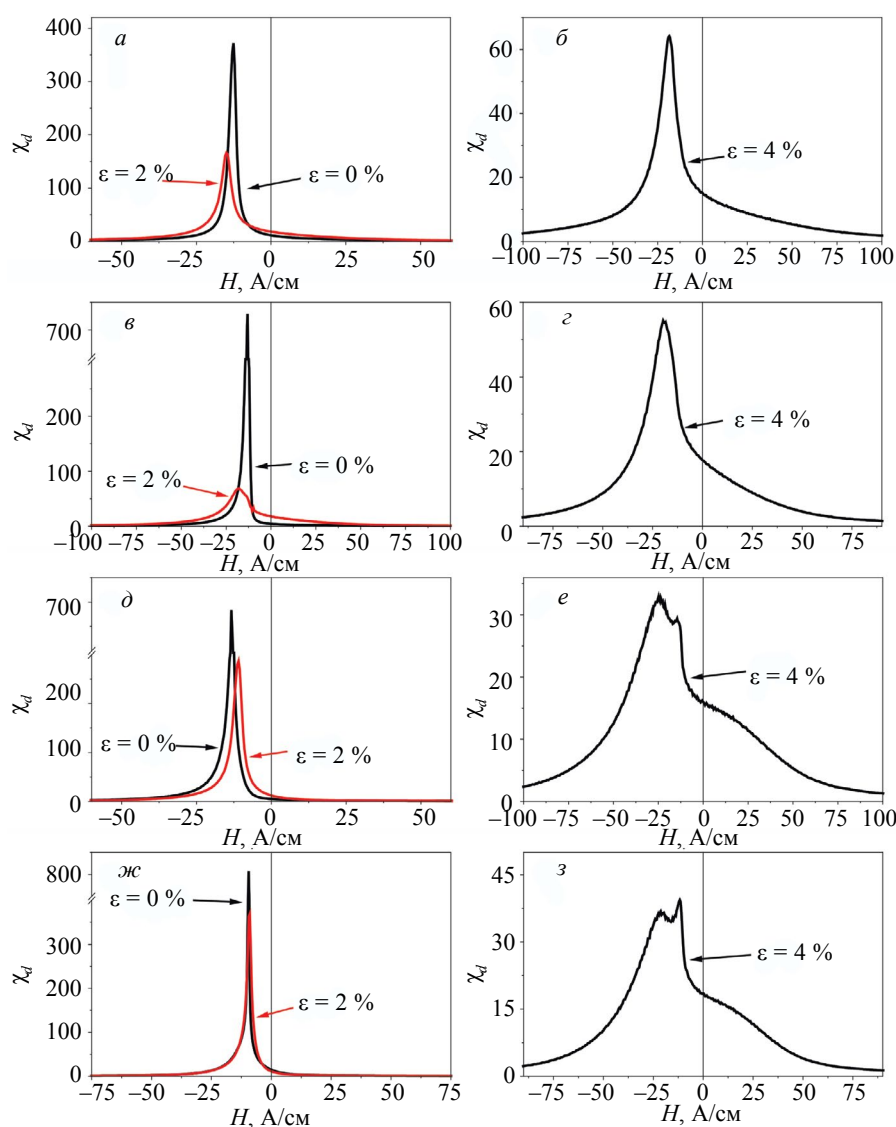


Рис. 2. Полевые зависимости дифференциальной магнитной восприимчивости, пластически деформированных образцов из стали 38ХС, предварительно закаленных и отпущенных при 500 °С (а, б), 600 °С (в, г), 650 °С (д, е) и 700 °С (ж, з).

его уширение. Наиболее выражено это происходит для образца с $T_{\text{отп}} = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 2б). Еще более явные отличия на кривых $\chi_d(H)$ наблюдаются для образцов с удлинением 4 %: для образцов с температурами отпуска $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 2б) и $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 2г) происходит еще большее уширение единственного пика, а для образцов с $T_{\text{отп}} = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 2е) и $T_{\text{отп}} = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 2з) на кривых появляется еще один максимум слева от основного и перегиб в положительном поле. Появление перегиба и дополнительного пика указывает на наличие в образцах магнитной текстуры типа «легкая плоскость», вызванной деформацией [7].

Характерно, что такая магнитная текстура в образцах из стали 38ХС не проявляется на начальном этапе пластической деформации ($\varepsilon = 2\%$), как, например, в образцах отожженной малоуглеродистой стали СтЗсп [7]. Даже при $\varepsilon = 4\%$ видимые перегибы и дополнительные максимумы отсутствуют на кривых $\chi_d(H)$ для образцов с $T_{\text{отп}} < 650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это может быть вызвано изначально высокими хаотически распределенными остаточными механическими напряжениями после термообработки, конкуренция которых с остаточными напряжениями, вызванными одноосной пластической деформацией, не дает возможности образоваться магнитной текстуре.

ВЫВОДЫ

Установлено, что после пластической деформации растяжением (при относительном удлинении 2 и 4 %) на зависимостях $H_c(T_{\text{отп}})$ появляются локальные максимумы в районе $600\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Локальный минимум на кривых $\mu_n(T_{\text{отп}})$ наблюдается при $T_{\text{отп}} = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, его местоположение не меняется после пластической деформации образцов. На полевых зависимостях дифференциальной магнитной восприимчивости особенности в виде перегиба и второго максимума появляются только для образцов с $\varepsilon = 4\%$ и температурами отпуска 650 и $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вероятно, при температурах отпуска более $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ уровень внутренних микронапряжений снижается настолько, что вызванные пластической деформацией остаточные механические напряжения сжатия могут сформировать магнитную текстуру типа «легкая плоскость», что и приводит к появлению особенностей на кривых $\mu_d(H)$. Характерно, что в отличие от отожженной малоуглеродистой стали, никаких особенностей на кривых $\mu_d(H)$ не наблюдается на начальной (при $\varepsilon = 2\%$) стадии пластической деформации в исследованном интервале температур отпуска от 500 до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № г.р. 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрявцев И.В. Материалы в машиностроении. Выбор и применение. Т. 2. М.: Металлургия, 1968. 498 с.
2. Гуляев А.П. Металловедение / Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
3. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 218 с.
4. Михеев М.Н., Морозова В.М., Вильданова Н.Ф., Гаврилова Л.Д., Захарова Г.Н., Ничипурук А.П., Ремез Н.В., Сингер К.Е., Чарикова Н.И. О возможности электромагнитного контроля качества закалки и отпуска изделий из стали 38ХС // Дефектоскопия. 1987. № 11. С. 38—44.
5. Ничипурук А.П., Горкунов Э.С., Кулеев В.Г., Чарикова Н.И. Влияние структурных изменений при отпуске на обратимые процессы намагничивания в конструкционных сталях // Дефектоскопия. 1990. № 8. С. 68—75.
7. Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel // NDT & E International. 2021. V. 118. P. 102398—102402. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102398
8. Gupta Bhaawan, Uchimoto Tetsuya, Ducharme Benjamin, Sebald Gael, Miyazaki Takamichi, Takagi Toshiyuki. Magnetic incremental permeability non-destructive evaluation of 12 Cr-Mo-W-V steel creep test samples with varied ageing levels and thermal treatments // NDT & E International. 2019. V. 104. P. 42—50.
9. Nan Wang, Peng Li, Tuiyan Li, Yujue Wang, Cunfu He, Xiucheng Liu. Quantitative characterization of tensile stress in electroplated nickel coatings with a magnetic incremental permeability sensor. Sensors and Actuators // A: Physical. 2024. V. 368. P. 115082.

REFERENCES

1. Kudryavcev I.V. Materialy v mashinostroenii. Vybory i primeneniye. T. 2. M.: Metallurgiya, 1968. 498 p.
2. Gulyaev A.P. Metallovedenie. Uchebnik dlya vuzov. 6-e izd., pererab. i dop. M.: Metallurgiya, 1986. 544 p.

3. Bida G.V., Nichipuruk A.P. Magnitnye svoystva termoobrabotannyh stalej. Ekaterinburg: UrO RAN, 2005. 218 p.
 4. Miheev M.N., Morozova V.M., Vil'danova N.F., Gavrilova L.D., Zaharova G.N., Nichipuruk A.P., Remez N.V., Singer K.E., Charikova N.I. O vozmozhnosti elektromagnitnogo kontrolya kachestva zakalki i otpuska izdelij iz stali 38HS // Defektoskopiya. 1987. No. 11. P. 38—44.
 5. Nichipuruk A.P., Gorkunov E.S., Kuleev V.G., Charikova N.I. Vliyanie strukturnyh izmenenij pri otpuske na obratimye processy namagnichivaniya v konstrukcionnyh stalyah // Defektoskopiya. 1990. No. 8. P. 68—75.
 6. Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel // NDT & E International. 2021. V. 118. P. 102398—102402. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102398
 8. Bhaawan Gupta, Tetsuya Uchimoto, Benjamin Ducharne, Gael Sebald, Takamichi Miyazaki, Toshiyuki Takagi. Magnetic incremental permeability non-destructive evaluation of 12 Cr-Mo-W-V steel creep test samples with varied ageing levels and thermal treatments // NDT & E International. 2019. V. 104. P. 42—50.
 9. Nan Wang, Peng Li, Tuyen Li, Yujue Wang, Cunfu He, Xiucheng Liu. Quantitative characterization of tensile stress in electroplated nickel coatings with a magnetic incremental permeability sensor. Sensors and Actuators // A: Physical. 2024. V. 368. P. 115082.
-

ОПТИМИЗАЦИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПОВ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

© 2024 г. Л.В. Михайлов^{1,*}, А.В. Михайлов^{1,**}, Ю.Л. Гобов^{1,***}, А.В. Никитин¹,
Я.Г. Смородинский¹, В.Н. Костин¹

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18
E-mail: *mikhaylov_lv@imp.uran.ru; **mikhaylov@imp.uran.ru; ***go@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 17.05.2024; после доработки 28.06.2024
Принята к публикации 28.06.2024

Рассмотрены методики оптимизации намагничивающих систем портативных дефектоскопов для бурильных труб, основной целью которых являются уменьшение массы, снижение энергопотребления и создание более однородного магнитного поля в рабочей области. Изложены недостатки традиционно используемых систем и предложены три пути их улучшения.

Ключевые слова: магнитный контроль, магнитные поля рассеяния, бурильные трубы, намагничивающие системы, моделирование.

OPTIMIZATION OF MAGNETIZING SYSTEMS FOR FLAW DETECTORS OF DRILL PIPES

© 2024 L.V. Mikhailov^{1,*}, A.V. Mikhailov^{1,**}, Yu.L. Gobov^{1,***}, A.V. Nikitin¹,
Ya.G. Smorodinskiy¹, V.N. Kostin¹

¹M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russia 620137 Yekaterinburg, S. Kovalevskoy St., 18
E-mail: *mikhaylov_lv@imp.uran.ru; **mikhaylov@imp.uran.ru; ***go@imp.uran.ru

The paper discusses methods for optimizing magnetizing systems of portable flaw detectors for drill pipes, the main purpose of which is to reduce weight, reduce energy consumption and create a more uniform magnetic field in the working area. The disadvantages of traditionally used systems are outlined and three ways to improve them are proposed.

Keywords: magnetic testing, magnetic flux leakage, drill pipes, magnetizing systems, modeling.

DOI: 10.31857/S0130308224090075

ВВЕДЕНИЕ

Проведение неразрушающего контроля бурильных труб непосредственно на нефтесервисных площадках с целью выявления возможности их повторного использования позволяет снизить эксплуатационные затраты. Для контроля тела трубы широко используются дефектоскопы, регистрирующие в приложенном магнитном поле поля рассеяния над дефектами. В таких устройствах в качестве намагничивающих систем используются катушки («Vedaq 2000-С», США; «МАГПОРТАБУР», Россия) [1, 2], которые устанавливаются с торца бурильной трубы. Создаваемое такими катушками магнитное поле в рабочей области на практике не превышает 150 А/см, что является недостаточным для обнаружения наименьшего дефекта по американскому стандарту DS-1 — сквозного сверления диаметром 1 мм [3, 4]. С целью повышения чувствительности метода, для увеличения амплитуды полей рассеяния, необходимо создавать в рабочей области поле повышенной напряженности (200—300 А/см). Попытки достичь таких значений с использованием катушек приводят к увеличению числа ампер-витков, и, как следствие, к увеличению массогабаритных характеристик и энергопотребления. Электрическая мощность катушек может достигать 1 кВт. На рис. 1 представлены амплитуды напряженности магнитного поля, создаваемого тремя катушками, входящими в комплект поставки Vedaq 2000-С, с массами обмоток 18, 20 и 23 кг. Так как средняя производительность контроля тела бурильной трубы составляет 200 штук за смену [5], производители приборов неразрушающего контроля стремятся к уменьшению массы намагничивающих систем.

Более точная локализация дефектов требует увеличения разрешающей способности дефектоскопов, для чего необходимо уменьшать размеры датчиков магнитного поля. В настоящее время для измерения магнитного поля используются индукционные датчики, чувствительность которых прямо пропорциональна их размерам. Чувствительность индукционных датчиков

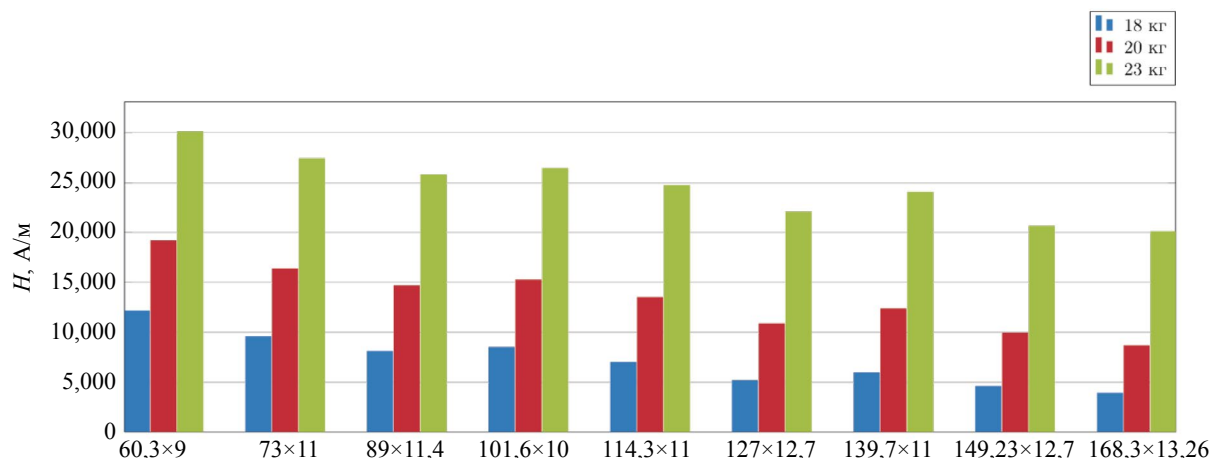


Рис. 1. Амплитуды напряженности магнитного поля в рабочей области при использовании трех катушек намагничивания с массами обмоток 18, 20 и 23 кг на всех существующих типоразмерах бурильных труб.

также зависит от скорости перемещения прибора неразрушающего контроля. Датчики Холла лишены этих недостатков, поэтому их применение является более целесообразным. Полного охвата трубы системой датчиков Холла можно добиться, устанавливая сектора с массивами датчиков в шахматном порядке [6], т.е. с двух сторон от оси симметрии катушки. Вследствие чего требуется обеспечение однородности магнитного поля во всей рабочей области, в которой располагаются датчики. Увеличение области однородного поля может быть достигнуто за счет увеличения, например, длины катушки, однако в этом случае будет снижаться напряженность магнитного поля. Как следствие, для увеличения напряженности следует снова увеличивать количество ампер-витков катушки, что приведет к еще большим энергозатратам и увеличению размеров и массы.

Помимо указанных выше недостатков катушки намагничивания обладают еще и конструктивным: катушку можно установить на трубу только с ее торца. Для увеличения удобства эксплуатации следует создавать намагничивающие системы, дающие возможность надевать их в произвольном месте на трубе. Достичь этого можно, сконструировав систему в распашном или разборном исполнении. В данной работе все описанные системы состоят из нескольких частей, соединенных шарнирами. В развернутом состоянии система накладывается на трубу, подвижные части сводятся между собой, и затем вся конструкция закрывается на замок.

Целью данной работы является разработка распашной намагничивающей системы магнитного сканера-дефектоскопа для бурильных труб, способной создавать в рабочей области однородное магнитное поле напряженностью порядка 200—300 А/см и обладающей при этом как можно меньшей массой.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Создаваемое разработанными намагничивающими системами магнитное поле было рассчитано методом конечных элементов в трехмерном случае с использованием программ с открытым исходным кодом: FreeCAD (построение геометрии), Gmsh (построение сеток), Elmer FEM (решение задач методом конечных элементов), ParaView (постобработка результатов).

Были разработаны трехмерные модели намагничивающих систем, представленные на рис. 2. Первая намагничивающая система представляет собой П-образный магнит (рис. 2а), она выполнена в распашном исполнении, таким образом ее можно устанавливать в произвольном месте трубы, а не только с торцов. Разработка данной системы описана в работе [7].

Для уменьшения влияния на напряженность магнитного поля магнитного сопротивления воздушного зазора по пути магнитопровод—стенка трубы была разработана система с ферромагнитными колесами (рис. 2б), которые служат продолжением магнитопровода.

Принципиально другой подход в увеличении магнитного потока реализует третья намагничивающая система (рис. 2в). За счет применения современных высокоэнергетических постоянных магнитов NdFeB наличие воздушного зазора 10—15 мм не становится причиной для значительного уменьшения магнитного потока. Магниты в этой системе представляют собой сектора с радиальной намагниченностью, направленной от оси симметрии на одном

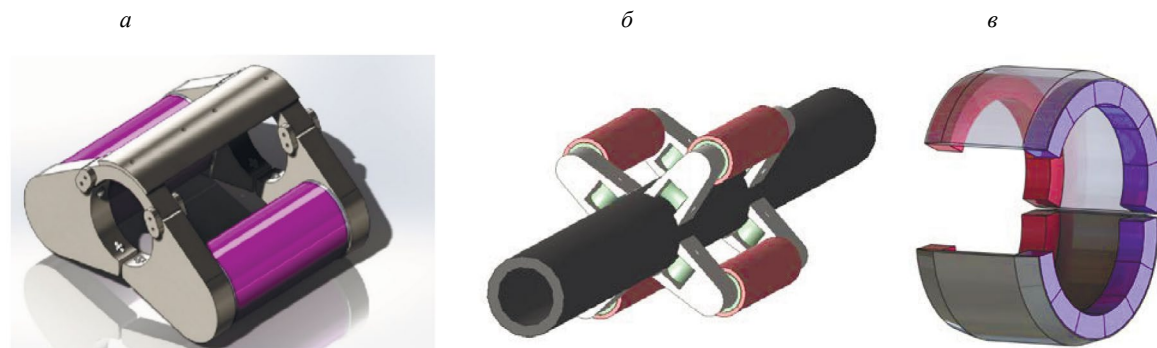


Рис. 2. Трехмерные модели намагничивающих систем: *а* — распашной с воздушным зазором 5 мм; *б* — с ферромагнитными колесами; *в* — с постоянными магнитами NdFeB с воздушным зазором 10 мм.

конце системы и к оси на другом. В качестве магнитопровода используются две половины трубы из магнитомягкого материала.

Задачи с каждой из моделей намагничивающих систем были сконфигурированы в случае намагничивания наибольшего типоразмера бурильных труб 168,3×13,26 мм согласно ГОСТ 631—75 [8]. Длина трубы составляла 2000 мм для исследования влияния размагничивающего фактора, ослабляющего напряженность магнитного поля, а значит ослабляющего и чувствительность магнитного контроля на участках, близких к концам трубы. Для обеспечения наибольшей достоверности результатов для материала трубы в задачу была введена полученная с использованием магнитометрического комплекса Remagraph C-500 [9] начальная кривая намагничивания стали марки 36Г2С, из которой изготавливается буровой инструмент согласно [10]. Определялась тангенциальная компонента напряженности магнитного поля на поверхности трубы вдоль ее оси в рабочей области. В этой области для минимизации ошибки расчетного метода было сосредоточено наибольшее количество конечных элементов наименьшего размера.

Во время расчетов геометрия намагничивающих систем корректировалась в тех зонах магнитопровода, в которых наблюдалось состояние технического насыщения ($B > 1,7$ Тл) ввиду падения в этих местах магнитной проницаемости, что является причиной уменьшения напряженности магнитного поля в рабочей области.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности трубы вдоль ее оси для каждой исследуемой намагничивающей системы представлены на рис. 3. Наибольшая длина намагниченного участка наблюдается в случае применения распашных систем с электромагнитами (куполообразные кривые), при этом разброс значений напряженности в области размещения датчиков составляет 3 %. Масса системы с воздушным зазором — 25 кг,

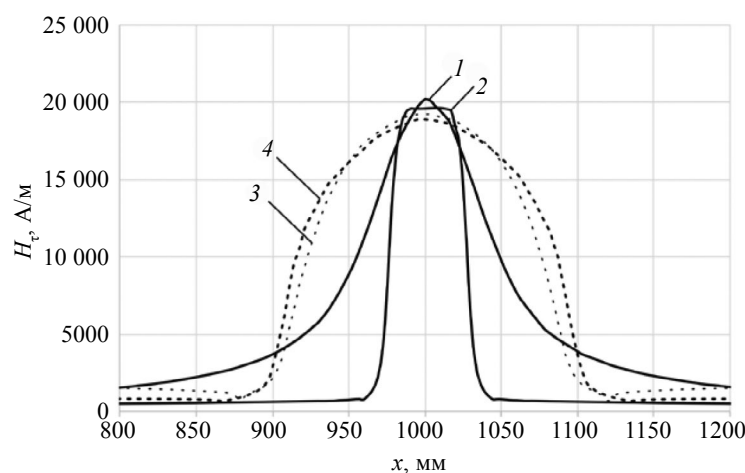


Рис. 3. Распределение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности трубы вдоль ее оси от намагничивающих систем: *1* — катушки; *2* — распашной с постоянными магнитами; *3* — распашной с воздушным зазором; *4* — распашной с ферромагнитными колесами.

системы с ферромагнитными колесами — 20 кг. Система с колесами имеет меньшую массу и энергопотребление, однако ее недостаток заключается в проходимости, поскольку жестко закрепленные колеса мешают преодолению зоны высадки бурильной трубы. Вследствие чего на теле трубы возникают не проконтролированные области в местах соединения тела трубы с замком. Также намагниченные контактирующие поверхности будут собирать мелкодисперсные ферромагнитные частицы, что приведет к затруднению вращения колес и ускорению их износа.

Намагничивающая система с постоянными магнитами NdFeB массой 18 кг создает поле с максимальной длиной однородно намагниченного участка (50 мм), что является достаточным для размещения датчиков магнитного поля. При этом зазор по пути магнит — стенка трубы составляет 10 мм, что не влияет на проходимость дефектоскопа. Энергопотребление такой системы сведено к нулю. Систему такого типа возможно сконструировать в распашном исполнении.

ВЫВОДЫ

Разработаны намагничивающие системы распашного типа с электромагнитами и с постоянными магнитами NdFeB для дефектоскопа бурильных труб, геометрические параметры которых были оптимизированы с целью максимизации напряженности и увеличения однородности магнитного поля в рабочей области. Поле, создаваемое разработанными намагничивающими системами, составляет 200—300 А/см, что соответствует полю катушки массой более 23 кг, при этом масса предлагаемых систем не превышает 20 кг.

Показано, что за счет применения современных высокоэнергетических постоянных магнитов возможно создать намагничивающую систему с увеличенным воздушным зазором, позволяющим сохранить проходимость дефектоскопа в зоне высадки бурильной трубы.

Показано, что применение постоянных магнитов вместо электромагнитов (как в форме соленоидов, так и П-образных систем) позволяет уменьшить массу намагничивающей системы на 20 % и существенно снизить потребляемую мощность приборов магнитного неразрушающего контроля бурильных труб, благодаря чему становится возможным создание их в портативном исполнении.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», Г.р. № 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Drill Pipe Inspection System. URL: <https://www.newtechsystems.com/products/emi-equipment/vedaqa-2000-c/> (дата обращения: 02.05.2024).
2. Портативная установка контроля бурильных труб магнитными методами неразрушающего контроля МАГПОРТАБУР. URL: <https://www.vimatec.ru> (дата обращения: 02.05.2024).
3. Хмелев С.В., Кетов А.Б., Шефер А.Г. Неразрушающий контроль бурового оборудования по стандарту DS-1 // БУРЕНИЕ И НЕФТЬ. 2022. № 3. С. 40—42.
4. DS-1. V. 3. Drill Stem Inspection. TH Hill Associates.
5. Марченко И., Юдаков Е., Чекмазов В., Кондратьев В. Методы и виды неразрушающего контроля в процессе инспекции (дефектоскопии) бурильных труб и условия ее проведения // ТехНАД-ЗОР. 2015. Т. 10. № 107. С. 128—129.
6. Wu J., Fang H., Li L., Wang J., Huang X., Kang Y., Sun Y., Tang C. A Lift-Off-Tolerant Magnetic Flux Leakage Testing Method for Drill Pipes at Wellhead // Sensors (Basel, Switzerland). 2017. V. 17. No. 1. P. 201.
7. Mikhailov A.V., Gobov Yu.L., Nikitin A.V., Popov S.E., Mikhailov L.V., Antokolsky L.I. Simulation of a closed-loop magnetizing system for a portable drill pipe magnetic flaw detector // AIP Conference Proceedings. 2022. V. 2466. No. 1. P. 040009.
8. ГОСТ 631—75 Трубы бурильные с высаженными концами и муфты к ним. Технические условия.
9. Hysteresegraph: PERMAGRAPH® und REMAGRAPH®. URL: <https://www.magnet-physik.de/messtechnik/hysteresegraphen/> (дата обращения: 06.05.2024).
10. ГОСТ Р 50278—92 Трубы бурильные с приваренными замками. Технические условия (с Поправкой, с Изменениями No. 1, 2).

REFERENCES

1. Drill Pipe Inspection System. URL: <https://www.newtechsystems.com/products/emi-equipment/vedaqa-2000-c/> (access date: 02.05.2024).
2. Portativnaya ustanovka kontrolya buril'nyh trub magnitnymi metodami nerazrushayushchego kontrolya MAGPORTABUR. URL: <https://www.vimatec.ru> (access date: 02.05.2024). (In Russian).
3. Khmelev S.V., Ketov A.B.I., Shafer A.G. Non-destructive testing of drilling equipment according to DS-1 standard // «Drilling and oil» magazine. 2022. No. 3. P. 40—42. (In Russian).

4. DS-1. V. 3. Drill Stem Inspection, TH Hill Associates.
 5. *Marchenko I., YUdakov E., CHEkmazov V., Kondrat'ev V.* Metody i vidy nerazrushayushchego kontrolya v processe inspekcii (defektoskopii) buril'nyh trub i usloviya ee provedeniya // *TexНАДЗОР*. 2015. V. 10. No. 107. P. 128—129. (In Russian).
 6. *Wu J., Fang H., Li L., Wang J., Huang X., Kang Y., Sun Y., Tang C.* A Lift-Off-Tolerant Magnetic Flux Leakage Testing Method for Drill Pipes at Wellhead // *Sensors* (Basel, Switzerland). 2017. V. 17. No. 1. P. 201.
 7. *Mikhailov A.V., Gobov Yu.L., Nikitin A.V., Popov S.E., Mikhailov L.V., Antokolsky L.I.* Simulation of a closed-loop magnetizing system for a portable drill pipe magnetic flaw detector // *AIP Conference Proceedings*. 2022. V. 2466. No. 1. P. 040009.
 8. GOST 631—75 Truby buril'nye s vysazhennymi koncami i mufty k nim. Tekhnicheskie usloviya. (In Russian).
 9. Hysteresegraph: PERMAGRAPH® und REMAGRAPH®. URL: <https://www.magnet-physik.de/messtechnik/hysteresegraphen/> (access date: 06.05.2024).
 10. GOST R 50278—92 Truby buril'nye s privarennymi zamkami. Tekhnicheskie usloviya (s Popravkoj, s Izmeneniyami No. 1, 2). (In Russian).
-

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ ДЕФЕКТА ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПЛАСТИНЫ ПУТЕМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МАГНИТОСТАТИКИ И СЕРИИ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ

© 2024 г. А.В. Никитин^{1,*}, Л.В. Михайлов^{1,**}, А.В. Михайлов¹, Ю.Л. Гобов¹,
В.Н. Костин¹, Я.Г. Смородинский¹

¹Институт физики металлов им. М.Н. Микеева УрО РАН,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18
E-mail: *an@imp.uran.ru; **mikhaylov_lv@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 17.05.2024; после доработки 28.06.2024

Принята к публикации 28.06.2024

Представлена методика верификации решения обратной геометрической задачи магнитостатики в пластине из магнитомягкого ферромагнетика. Методика состоит из решения ряда прямых задач, в которых в качестве первого приближения используют форму дефекта, полученного в результате решения обратной геометрической задачи магнитостатики, а далее, увеличивая либо уменьшая глубину дефекта, не меняя при этом форму граничной поверхности, — сравнения топографий компонент магнитного поля, полученных в ходе измерений над поверхностью пластины и вычисленных (в результате решения прямой задачи) в тех же точках компонент магнитного поля рассеяния от реконструированного трехмерного дефекта. В результате применения методики также могут быть уточнены геометрические параметры исследуемого дефекта. Получение начальных условий для решения обратной задачи и решение прямых задач магнитостатики осуществляется с помощью метода конечных элементов в программе ELMER. Методика работает при одностороннем доступе к любой поверхности пластины (бездефектной поверхности, либо поверхности с дефектом).

Ключевые слова: метод регистрации магнитного потока рассеяния, обратная геометрическая задача магнитостатики, прямая задача магнитостатики, метод конечных элементов, дефектометрия.

RECONSTRUCTION OF THE SHAPE OF A FLAW IN FERROMAGNETIC PLATE BY SOLVING INVERSE PROBLEM OF MAGNETOSTATICS AND SERIES OF DIRECT PROBLEMS

© 2024 A.V. Nikitin^{1,*}, L.V. Mikhaylov^{1,**}, A.V. Mikhaylov¹, Yu.L. Gobov¹,
V.N. Kostin¹, Ya.G. Smorodinskii¹

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences
Russia 620108 Yekaterinburg, S. Kovalevskaya Str., 18
E-mail: *an@imp.uran.ru; **mikhaylov_lv@imp.uran.ru

The article presents a verification technique for solving the inverse geometric problem of magnetostatics in a soft magnetic ferromagnet plate. The technique involves solving a number of direct problems, in which the shape of the defect obtained by solving the inverse geometric problem of magnetostatics is used as a first approximation, and then increasing or decreasing the depth of the defect without changing the shape of the boundary surface — comparing the topographies of the magnetic field components obtained during measurements above the plate surface and calculated (as a result of solving the direct problem) at the same points of the components of the magnetic stray field from the reconstructed three-dimensional defect. As a result of applying the technique, the geometric parameters of the defect under study can also be refined. Obtaining the initial conditions for solving the inverse problem and solving direct problems of magnetostatics is carried out using the finite element method in the ELMER program. The technique works with one-sided access to any surface of the plate (a defect-free surface or a surface with a defect).

Keywords: magnetic leakage flux registration method, inverse geometric problem of magnetostatics, direct problem of magnetostatics, finite element method, defectometry.

DOI: 10.31857/S0130308224090086

На начальном этапе развития неразрушающего контроля методом регистрации магнитного потока рассеяния (MFL-метод) предполагалось, что при помощи различных подходов, путем сравнения топографии измеренного магнитного поля над поверхностью объекта контроля, содержащего дефект, с топографией поля эталонного дефекта удастся определить тип и геометрические параметры формы обнаруженного дефекта [1—6]. Однако большое разнообразие дефектов, а также нелинейный отклик ферромагнетика на внешнее намагничивающее поле, не позволяют устойчивым образом решать такие задачи. Области применения полученных аналитических формул для вычисления компонент магнитного поля эталонных дефектов в зависимости от конкретных параметров задачи ограничены и требуют большого числа поправочных коэффициентов [7], а численные расчеты прямых задач магнитостатики позволяют получать

топографии магнитных полей только от конкретной геометрии границы металла. По этим причинам для решения практических задач по определению геометрических параметров формы исследуемого дефекта становится важной разработка методик решения обратной геометрической задачи магнитостатики для трехмерного случая с учетом нелинейного характера зависимости магнитной индукции в ферромагнетике от внешнего намагничивающего поля. Решение обратной геометрической задачи магнитостатики не требует иной априорной информации кроме информации о характере нелинейной зависимости величины магнитной индукции ферромагнитного материала от величины внешнего намагничивающего поля. Впервые такая обратная геометрическая задача магнитостатики для двумерного линейного случая была решена в работе [8]. В работе [9] были получены расчетные формулы для определения граничных поверхностей дефекта потери сплошности металла для трехмерного линейного случая и при условии, что ферромагнетик намагничен до насыщения, а именно, вектор намагниченности во всем ферромагнетике постоянен по величине и направлению.

В работах [10—12] была разработана методика решения обратной геометрической задачи магнитостатики в трехмерном случае с учетом нелинейного отклика ферромагнетика на внешнее намагничивающее поле для класса дефектов, чьи граничные поверхности можно описать с заданной точностью отрезком двойного ряда Фурье (рис. 1). Из этого класса дефектов исключены трещины и трещиноподобные дефекты (определяем такие дефекты согласно [13]). В дальнейшем будем использовать результаты именно этой методики решения обратной геометрической задачи магнитостатики.

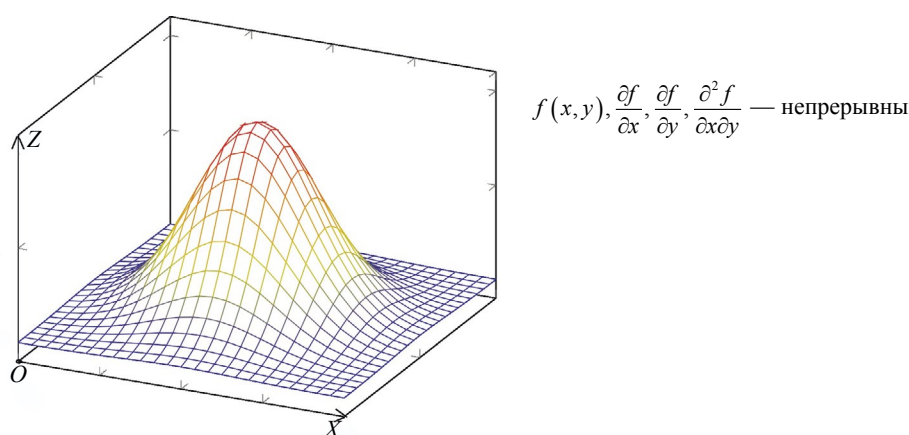


Рис. 1. Пример функции $f(x, y)$, представимой в виде отрезка двойного ряда Фурье в исследуемой области.

Целью данной работы является реализация алгоритма методики по проверке правильности решения обратной геометрической задачи магнитостатики и, возможно, последующего уточнения геометрических параметров формы дефекта на численном эксперименте.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Представленная в работах [10—12] методика вне зависимости от взаимного расположения дефекта и магнитных преобразователей (рис. 2) позволяет решить обратную геометрическую задачу магнитостатики и найти приближенную форму дефекта без использования каких-либо поправочных коэффициентов.

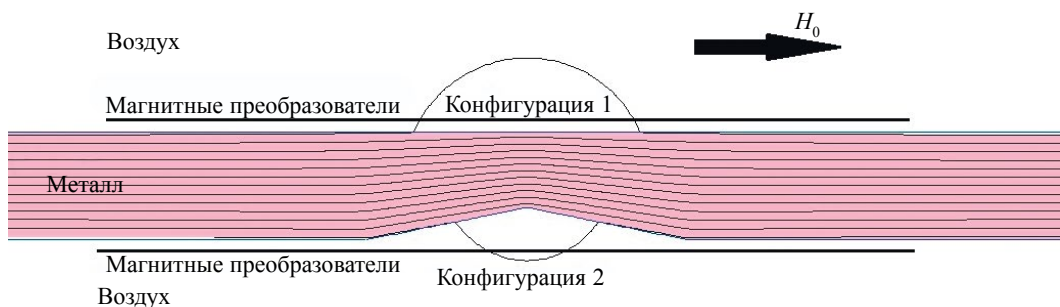


Рис. 2. Сечение исследуемой ферромагнитной пластины в поперечном направлении. Намагничивающее поле H_0 направлено вдоль оси OX .

Для определенности выберем конфигурацию 1 на рис. 2 и на ее примере покажем, как работает предлагаемая методика. В результате решения обратной геометрической задачи получим приближенную форму дефекта, как на рис. 3—4.



Рис. 3. Поперечное сечение пластины с реконструкцией границы металла в области дефекта, полученное в результате решения обратной геометрической задачи.

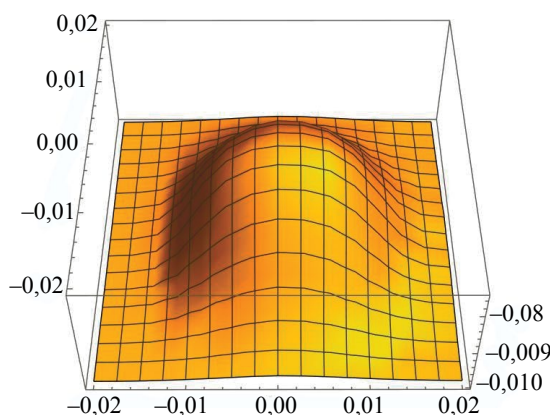


Рис. 4. Граница куполообразного дефекта с размерами $25 \times 25 \times 3$ мм, полученная в результате решения обратной геометрической задачи магнитостатики для пластины из стали 20 толщиной 10 мм.

Для получения начальных условий, т.е. «измеренных» значений компонент магнитного поля над бездефектной поверхностью, использовалось решение прямой задачи в программе ELMER.

Заметим, что размеры дефекта на поверхности пластины определяются по топографии измеренных компонент магнитного поля рассеяния. Поэтому реконструируем дефект с учетом полученной в результате измерений магнитного поля информации о краях дефекта на поверхности пластины (рис. 5). Затем сдвинем поверхность дефекта, целиком углубляя и уменьшая глубину дефекта.

Будем считать, что форма реконструированного дефекта наилучшим образом соответствует форме реального дефекта, если достигается минимум положительного среднего отклонения (1) икс-компонент напряженности магнитных полей рассеяния упомянутых ранее дефектов в точках на уровне измерений, на линии, параллельной оси OX и проходящей через центр дефекта



Рис. 5. Поперечное сечение пластины. Реконструкция формы дефекта выполнена с учетом его реальных размеров на поверхности пластины.

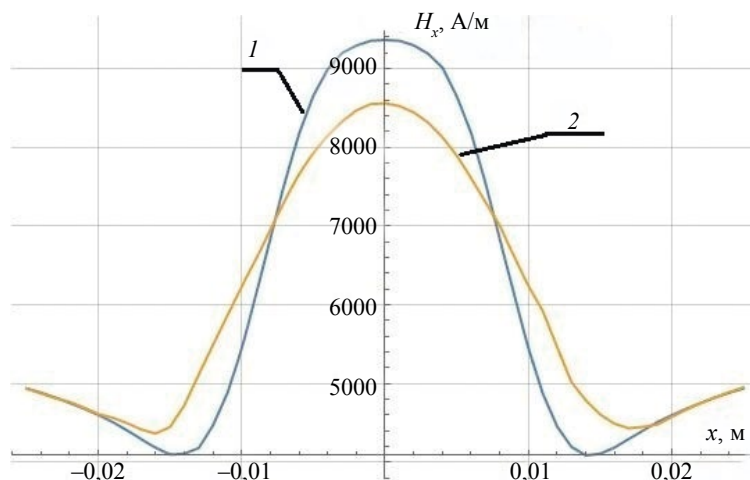


Рис. 6. График значений икс-компонент напряженности магнитного поля на поверхности измерений, на линии, проходящей через центр дефекта по оси OX . 1 — значения H_{x0} исследуемого дефекта; 2 — значения H_{xr} реконструированного дефекта.

(рис. 6). В нашем случае центр дефекта также легко определить по топографии компонент «измеренного» магнитного поля:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{x0,i} - H_{xr,i}), \quad (1)$$

где N — общее число точек на указанной в тексте линии; i — номер точки на линии; $H_{x0,i}$, $H_{xr,i}$ — икс-компоненты напряженности магнитного поля в точках на линии исследуемого и реконструированного дефектов соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 7 приведен график изменения среднего отклонения D в зависимости от смещения поверхности дефекта на величину S ; $S = 0$ соответствует форме дефекта, полученной в результате решения обратной геометрической задачи.

В результате решения обратной геометрической задачи магнитостатики был реконструирован куполообразный дефект со следующими параметрами формы $25 \times 25 \times 2,5$ мм. Глубина реконструированного дефекта отличается от глубины реального дефекта на 16,7 %. При этом величина среднего отклонения D составила 150 А/м. Уменьшение глубины дефекта на 0,25 мм

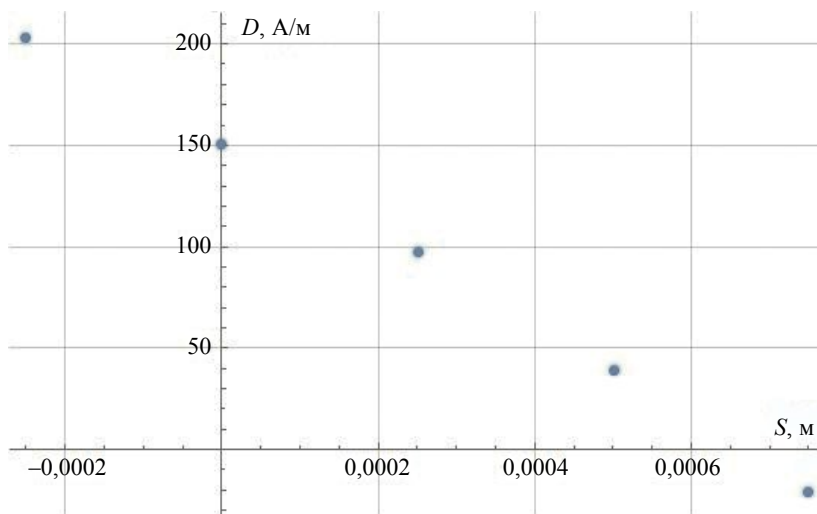


Рис. 7. Зависимость среднего отклонения D от смещения по вертикали поверхности дефекта. Положительный знак S соответствует увеличению глубины дефекта.

приводит к росту D . Минимальное положительное значение D достигается при увеличении глубины дефекта на 0,5 мм, что соответствует геометрическим параметрам реального дефекта.

ВЫВОДЫ

С помощью предложенной методики верифицируется решение обратной геометрической задачи магнитостатики и возможно уточнение значений геометрических параметров формы исследуемого дефекта.

Л.В. Михайлов благодарит Институт физики металлов имени М.Н. Михеева за поддержку его работы по государственному заданию Минобрнауки России по теме «Диагностика», которая выполнялась в рамках молодежного проекта ИФМ УрО РАН № М8-23.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика» №122021000030–1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янус Р.И. Некоторые вопросы теории магнитной дефектоскопии // Труды ИФМ УФАИ СССР. 1948. Вып. 7. С. 23—37.
2. Вонсовский С.В. Простейшие расчеты для задач магнитной дефектоскопии // Журнал технической физики. 1938. Т. 8. № 16. С. 1453—1467.
3. Аркадьев В.К. О развитии теоретических основ дефектоскопии // Известия АН СССР. Отделение технических наук. 1937. № 2. С. 233—239.
4. Зацепин Н. Н., Щербинин В.Е. К расчету магнитостатического поля поверхностных дефектов. I. Топография полей моделей дефектов // Дефектоскопия. 1966. № 5. С. 50—58.
5. Ферстер Ф. Неразрушающий контроль методом магнитных полей рассеяния. Теоретические и экспериментальные основы выявления поверхностных дефектов конечной и бесконечной глубины // Дефектоскопия. 1982. № 11. С. 3—25.
6. Загидулин Р.В., Мужичский В.Ф., Курозаев В.И. Расчет магнитостатического поля внутреннего дефекта и дефекта внутренней поверхности в ферромагнитной пластине. II Магнитное поле дефекта в воздухе. Нелинейная среда // Дефектоскопия. 1997. № 1. С. 55—62.
7. Халилеев П.А., Патраманский Б.В., Лоскутов В.Е., Корзунин Г.С., Щербинин В.Е.. Выявляемость дефектов в трубопроводах из различных марок стали в зависимости от их конфигурации // Дефектоскопия. 2000. № 8. С. 22—33.
8. Кротов Л.Н. Реконструкция границы раздела сред по пространственному распределению магнитного поля рассеяния. II. Постановка и метод решения обратной геометрической задачи магнитостатики // Дефектоскопия. 2004. № 6. С. 36—44.
9. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. Обратная задача магнитостатики в полях насыщения // Дефектоскопия. 2019. № 10. С. 35—44.
10. Гобов Ю.Л., Никитин А.В., Попов С.Э. Решение обратной геометрической задачи магнитостатики для дефектов коррозии с учетом нелинейных свойств ферромагнетика // Дефектоскопия. 2018. № 12. С. 31—37.
11. Никитин А.В., Гобов Ю.Л., Михайлов А.В., Михайлов Л.В. Методика решения обратной геометрической задачи магнитостатики для поверхностных дефектов магнитомягкого ферромагнетика // Дефектоскопия. 2022. № 58. С. 24—34.
12. Никитин А.В., Михайлов А.В., Михайлов Л.В., Гобов Ю.Л., Костин В.Н., Смородинский Я.Г. Область применимости методики построения линий магнитной индукции для дефектометрии протяженных объектов // Дефектоскопия. 2023. № 59. С. 51—59.
13. Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines. 2016. <https://pipelineoperators.org/>

REFERENCES

1. Janus R.I. Some issues of the theory of magnetic flaw detection // Proceedings of the Institute of Metallurgy of the Ufa Academy of Sciences of the USSR. 1948. Is. 7. P. 23—37.
2. Vonsovsky S.V. The simplest calculations for magnetic flaw detection problems // Journal of Technical Physics. 1938. V. 8. No. 16. P. 1453—1467.
3. Arkadyev V.K. On the development of theoretical foundations of flaw detection // Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Branch of Technical Sciences. 1937. No. 2. P. 233—239.
4. Zatsepin N.N., Shcherbinin V.E. On the calculation of the magnetostatic field of surface defects. I. Topography of the fields of defect models // Defectoscopy. 1966. No. 5. P. 50—58.
5. Forster F. Non-destructive testing by magnetic stray fields. Theoretical and experimental principles of detection of surface defects of finite and infinite depth // Defectoscopy. 1982. No. 11. P. 3—25.
6. Zagidulin R.V., Muzhitsky V.F., Kurozaev V.I. Calculation of magnetostatic field of internal defect and internal surface defect in ferromagnetic plate. II Magnetic field of defect in air. Nonlinear medium // Defectoscopy. 1997. No. 1. P. 55—62.

7. *Khaleev P.A., Patramansky B.V., Loskutov V.E., Korzunin G.S., Shcherbinin V.E.* Detectability of defects in pipelines made of different steel grades depending on their configuration // *Defectoscopya*. 2000. No. 8. P. 22—33.
8. *Krotov L.N.* Reconstruction of the interface between media based on the spatial distribution of the leakage magnetic field. II. Statement and solution method for the inverse geometric problem of magnetostatics // *Defectoscopya*. 2004. No. 6. P. 36—44.
9. *Dyakin V.V., Kudryashova O.V., Raevsky V.Ya.* Inverse problem of magnetostatics in saturation fields // *Defectoscopya*. 2019. No. 10. P. 35—44.
10. *Gobov Yu.L., Nikitin A.V., Popov S.E.* Solution of the inverse geometric problem of magnetostatics for corrosion defects taking into account the nonlinear properties of a ferromagnet // *Defectoscopya*. 2018. No. 12. P. 31—37.
11. *Nikitin A.V., Gobov Yu.L., Mikhailov A.V., Mikhailov L.V.* Methodology for solving the inverse geometric problem of magnetostatics for surface defects of a soft magnetic ferromagnet // *Defectoscopya*. 2022. No. 58. P. 24—34.
12. *Nikitin A.V., Mikhailov A.V., Mikhailov L.V., Gobov Yu.L., Kostin V.N., Smorodinskii Ya.G.* Scope of applicability of the technique for constructing magnetic induction lines for flaw detection of extended objects // *Defectoscopya*. 2023. No. 59. P. 51—59.
13. Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines. 2016. <https://pipelineoperators.org/>

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ГАЗОПРОВОДА В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НА СТЕНКУ ТРУБЫ

© 2024 г. А.В. Михайлов^{1,*}, Л.В. Михайлов¹, Н.Ю. Трякина^{2,**}, С.В. Трапезников², А.С. Саломатин², С.С. Кукушкин^{2,***}, Я.Г. Смородинский¹, В.Н. Костин¹, О.Н. Василенко¹

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,

Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

²ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург»,

Россия 620075 Екатеринбург, ул. Клары Цеткин, 14

E-mail: *mikhaylov@imp.uran.ru; **N.Tryakina@ekaterinburg-tr.gazprom.ru;

***S.Kukushkin@ekaterinburg-tr.gazprom.ru

Поступила в редакцию 30.05.2024; после доработки 20.06.2024

Принята к публикации 21.06.2024

Представлен анализ возможности образования сквозных дефектов газопровода в результате кратковременного воздействия дугового разряда. Приведены результаты металлографии, электронной микроскопии, элементного анализа, а также результаты моделирования, подтверждающие возможность образования сквозных дефектов в стенке газопровода толщиной 7 мм за время воздействия дугового разряда менее 2 с.

Ключевые слова: дефект, газопровод, дуговой разряд, металлография, электронная микроскопия, элементный анализ.

ANALYSIS OF THE GAS PIPELINE DEFECTS FORMATION MECHANISM AS A RESULT OF ARC DISCHARGE IMPACT ON THE PIPE WALL

© 2024 A.V. Mikhailov^{1,*}, L.V. Mikhailov¹, N.Yu. Tryakina^{2,**}, S.V. Trapeznikov², A.S. Salomatin², S.S. Kukushkin^{2,***}, Ya.G. Smorodinskii¹, V.N. Kostin¹, O.N. Vasilenko¹

¹M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia 620137 Yekaterinburg, S. Kovalevskoy St., 18

²Gazprom Transgaz Yekaterinburg LLC, Russia 620075 Yekaterinburg, Klara Zetkin St., 14

E-mail: *mikhaylov@imp.uran.ru; **N.Tryakina@ekaterinburg-tr.gazprom.ru;

***S.Kukushkin@ekaterinburg-tr.gazprom.ru

The article presents an analysis of the formation possibility through defects in a gas pipeline as a result of short-term exposure to an arc discharge. The results of metallography, electron microscopy, elemental analysis, as well as the modeling results, confirming the formation possibility through defects in a 7 mm thick gas pipeline wall during an exposure to an arc discharge of less than 2 seconds are presented.

Keywords: defect, gas pipeline, arc discharge, metallography, electron microscopy, elemental analysis.

DOI: 10.31857/S0130308224090094

При обследовании газопровода, проходящего под высоковольтной линией 110 кВ, в районе верхней образующей трубы были обнаружены дефекты, внешний вид которых имел признаки воздействия электрической дуги, в том числе наплывы и брызги металла, оплавленные края кратера дефектов. На внутренней стенке трубы в зоне каждого дефекта выявлены локальные потемнения, характерные для термического воздействия на металл (рис. 1).

Было выдвинуто предположение о повреждении газопровода в результате воздействия мощного дугового разряда на стенку трубы с проплавлением металла и образованием сквозных дефектов. Такая ситуация может возникнуть, например, в результате удара молнии [1—3]. Для подтверждения предположения были подготовлены темплеты, содержащие дефектные участки трубы, а также проведены лабораторные исследования по определению структуры и элементного состава материала трубопровода в местах его повреждений и механические испытания. Рассмотрены сценарии возникновения мощных дуговых разрядов в грунте природного или техногенного характера.

По результатам локального **спектрального анализа** металла непосредственно в очаге дефектов установлено наличие повышенного количества примесных элементов (кремний, алю-

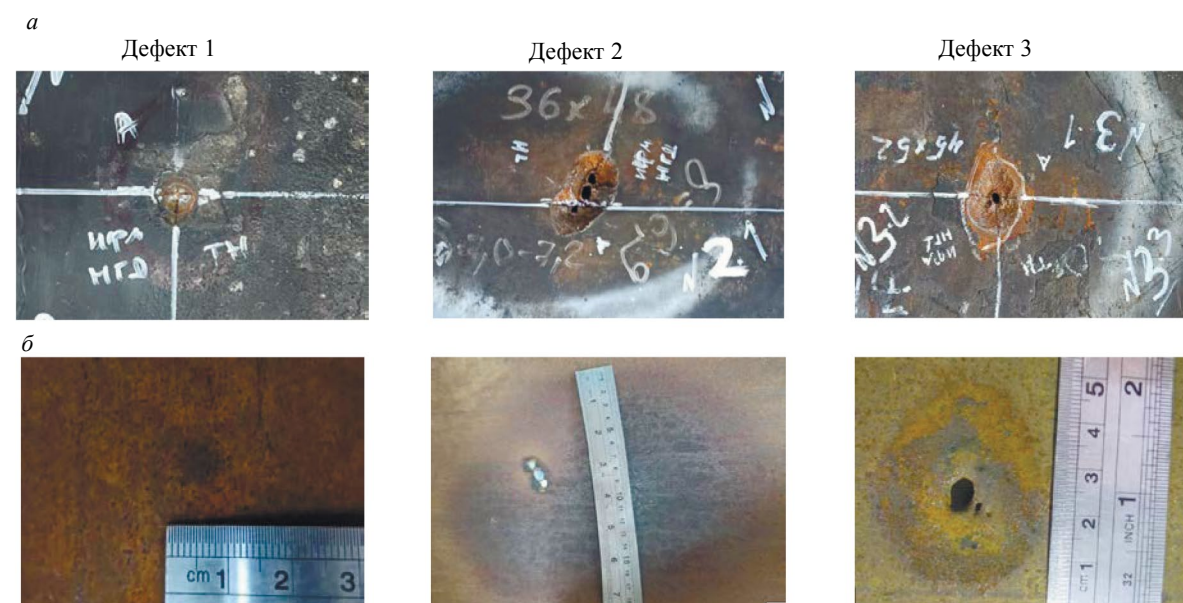


Рис. 1. Повреждения, выявленные при обследовании газопровода: наружная поверхность (*a*); внутренняя поверхность (*б*).

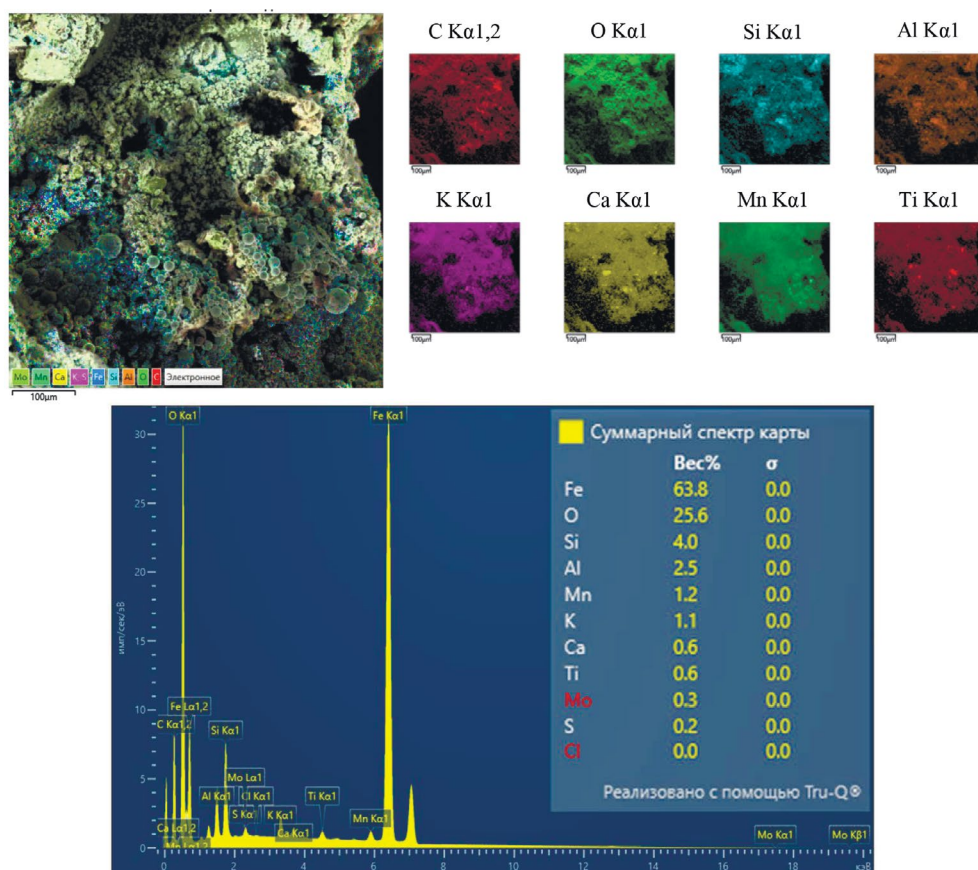


Рис. 2. Результаты элементного анализа вблизи очага дефекта.

миний, калий, кальций, титан) вследствие переноса их из грунта при высокотемпературном воздействии. Присутствие примесных элементов в грунте в месте укладки газопровода подтверждено также качественным **элементным анализом** (рис. 2).

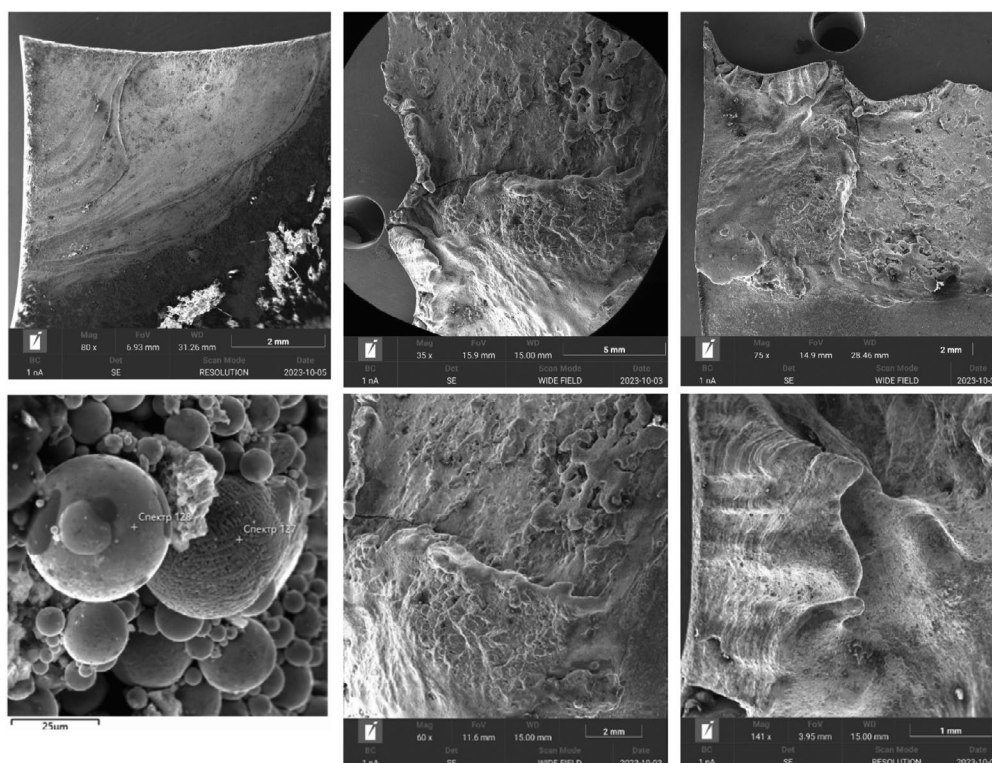


Рис. 3. Следы расплавления металла в зоне кратеров сквозных дефектов (электронная микроскопия).

После проведения **металлографических** исследований было установлено, что структура металла трубы вдали от дефектов — феррито-перлитная, характерная для горячекатаной низколегированной трубной стали. В зоне дефекта с малым проплавлением на глубину до 700 мкм от поверхности наблюдается слой металла, характеризующийся наличием участков столбчатой структуры, затем наблюдается переходная зона глубиной до 600 мкм со структурой неполного проплавления. Такая структура характерна для процессов формирования сварочной ванны. В случае образования дефектов с большим проплавлением на глубину до 700 мкм от поверхности установлено наличие зоны со структурой мартенсита, образование которого характерно для высокотемпературного нагрева с последующим резким охлаждением.

Электронно-микроскопический анализ показал, что на внешней поверхности трубопровода в кратере дефектов присутствуют множественные очаги оплавления металла, для которых характерны плавные линии внешних контуров, отдельные сформированные капли металла, напоминающие брызги (рис. 3). На внутренней поверхности трубопровода подобных явлений не наблюдается, что свидетельствует о высокотемпературном точечном воздействии именно на внешнюю поверхность трубы.

Измерения твердости по сечению стенки трубы (рис. 4) от поверхности вглубь образцов в зоне дефектов показали наличие резкого скачка твердости с 200—250 HV в основном металле до 450—600 HV в зоне закалочной структуры на поверхности. На расстоянии порядка 700 мкм от поверхности дефекта различима четкая граница, разделяющая подвергнутый термическому воздействию металл и основной. Данная картина характера для трех исследованных дефектов.

Расчет методом конечных элементов распространения зоны проплавления подтвердил, что множественные повреждения стенки трубопровода возможны в течение достаточно короткого времени воздействия дугового разряда: для толщины стенки трубы 6,5 мм оно составляет 1,8 с (рис. 5). При этом в случае множественных поражений стенки трубы для сквозного повреждения стенки трубопровода достаточно тока 200—300 А.

Сопоставление наблюдаемых и расчетных размеров повреждения позволяет заключить, что для указанного диапазона тока единичного разряда радиус дугового канала составляет величину порядка (3—7) мм. Принимая во внимание, что токи через единичный дуговой канал во время, например, разряда молнии характеризуются амплитудами 10—150 кА при длительности импульса до 100 мкс [4], можно предполагать, что указанного тока наряду с диффузной зоной

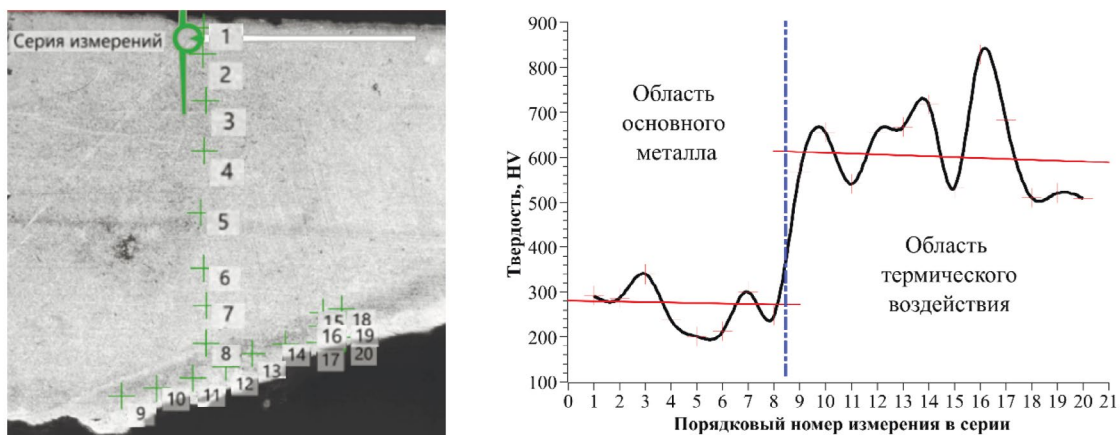


Рис. 4. Результаты измерения микротвердости для образца с дефектом.

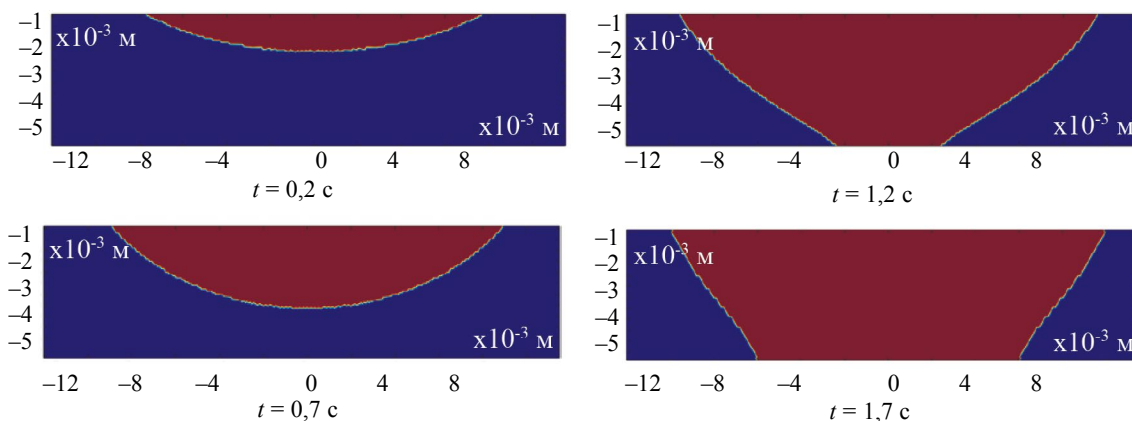


Рис. 5. Конфигурация зоны плавления в различные моменты времени, ток дуги 300 А, радиус канала 7 мм.

растекания достаточно для образования трех дуговых каналов с указанными в предыдущем пункте заключения токами, что соответствует числу повреждений, обнаруженных в стенке трубопровода.

Максимальная длина зарегистрированных в экспериментах [5] искровых каналов для характерных для молнии токов, стекающих с заземляющей проводящей структуры, составляет 10—20 м. Поэтому при инициации канализированной структуры при ударе молнии опасным расстоянием от места удара молнии до трассы трубопровода можно считать величину менее 20 м.

Теоретический анализ конфигурации зоны плавления вследствие распространения теплового потока плазменной дуги в различные моменты времени согласовывается с характером повреждений газопровода (см. рис. 1).

Таким образом, по результатам выполненных исследований показано, что вероятным механизмом повреждения трубопровода с образованием дефектов с оплавлением металла трубы явилось образование в грунте дугового разряда природного или техногенного характера.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», Г.р. № 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Venturino P., Booman J.N., Gonzalez M.O., Otegui J.L. Pipeline failures due to lightning // Engineering Failure Analysis. 2016. P. 1—12. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.02.021>
2. Quickel G.T., Beavers J.A. Pipeline Failure Results from Lightning Strike: Act of Mother Nature? // J. Fail. Anal. and Preven. 2011. V. 11. P. 227—232. <https://doi.org/10.1007/s11668-011-9447-y>

3. *Pikas J., Shoaf W.* The lightning threat to pipelines and coatings // *Journal of Pipeline Engineering*. 2010. V. 9. Is. 3. P. 191.
4. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащита. М.: Физматлит, 2001. 320 с. Текст: непосредственный.
5. *Вилков Ю.В., Кравченко А.С., Саиткулов М.М., Селемир В.Д., Терехин В.А., Тютяев А.А.* Формирование токового импульса молнии отрицательной полярности с помощью взрывомagnetного генератора // *Приборы и техника эксперимента*. 2007. № 3. С. 64—71.

REFERENCES

1. *Venturino P., Booman J.N., Gonzalez M.O., Otegui J.L.* Pipeline failures due to lightning // *Engineering Failure Analysis*. 2016. P. 1—12. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.02.021>
2. *Quickel G.T., Beavers J.A.* Pipeline Failure Results from Lightning Strike: Act of Mother Nature? // *J. Fail. Anal. and Preven.* 2011. V. 11. P. 227—232. <https://doi.org/10.1007/s11668-011-9447-y>
3. *Pikas J., Shoaf W.* The lightning threat to pipelines and coatings // *Journal of Pipeline Engineering*. 2010. V. 9. Is. 3. P. 191.
4. *Bazelyan E.M., Rajzer Yu.P.* Fizika molnii i molniezashchita. M.: Fizmatlit, 2001. 320 p. (In Russian).
5. *Vilkov Yu.V., Kravchenko A.S., Saitkulov M.M., Selemir V.D., Terekhin V.A., Tyutyayev A.A.* Formirovaniye tokovogo impul'sa molnii otricatel'noj polyarnosti s pomoshch'yu vzryvomagnitnogo generatora // *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2007. Is. 3. P. 64—71. (In Russian).



22.10.2024 — 24-я Международная выставка оборудования для неразрушающего контроля NDT Russia 2024

Страна: **Россия**

Город: **Москва**

<https://www.ndt-russia.ru>

Даты: 22.10.2024—24.10.2024

Место: Москва, МВЦ «Крокус Экспо»,
павильон 1, зал 3

Выставка **NDT Russia** ежегодно собирает широкую аудиторию специалистов, которые представляют крупнейшие промышленные предприятия не только в России, но и в странах ближнего зарубежья. В 2023 году NDT Russia посетили специалисты из 59 регионов России и из других стран, по сравнению с предыдущей выставкой количество посетителей выросло на 38%: зал, в котором проходила выставка, посетил 6 471 специалист, из которых 1 353 человека интересовались только оборудованием для неразрушающего контроля.

Специалисты посещают выставку, чтобы протестировать в действии образцы приборов и оборудования для неразрушающего контроля большого количества производителей, найти новых партнеров и поставщиков, узнать первыми о новых разработках и технологических решениях и обсудить технические вопросы применения оборудования на объектах со специалистами компаний-участников.

Участники выставки представят широкий ассортимент оборудования для неразрушающего контроля различными методами:

- акустико-эмиссионного контроля;
- вибродиагностического контроля;
- визуального и измерительного контроля;
- оптического контроля;
- вихретокового контроля;
- теплового контроля;
- контроля проникающими веществами;
- магнитного контроля;
- магнитопорошкового контроля;
- механического контроля;
- радиационного контроля;
- радиоволнового контроля;
- ультразвукового контроля и других.

Посещение NDT Russia — бесплатное для специалистов, при регистрации на сайте выставки укажите промокод NDTSPACE: <https://www.ndt-russia.ru/ru-RU/visitors/e-ticket.aspx>

В 2024 году участие в выставке уже подтвердило более 45 компаний, в числе которых: Пергам-Инжиниринг, Диагностика-М, Эхо+, НПП «Крокус», НПП «Машпроект», Спектрофлэш, Синтез НПФ, НУЦ Качество и многие другие компании. Если вы желаете представить оборудование вашей компании на выставке NDT Russia, пожалуйста, заполните заявку на сайте.

В этом году на площадке выставки традиционно пройдет Практическая конференция по неразрушающему контролю, а также состоится награждение финалистов конкурса «Лучший специалист НК» 2024.

Также на выставке впервые состоится розыгрыш призов для посетителей, где каждый желающий может попытать удачу и выиграть ценные и памятные призы от партнеров мероприятия!

Подробнее о выставке – на сайте www.ndt-russia.ru

14-16 АПРЕЛЯ 2025 ГОДА

**XII МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ**

МОСКВА · ЦВК ЭКСПОЦЕНТР

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ
ИСПЫТАНИЯ · ДИАГНОСТИКА****Уважаемые коллеги!**

14—16 апреля 2025 года состоится 12-й международный промышленный форум «Территория NDT. Неразрушающий контроль. Испытания. Диагностика».

Форум расположится в павильоне 2.6 в ЦВК «Экспоцентр» на Красной Пресне.

Традиционно, Форум является крупнейшей дискуссионной площадкой, где эксперты делятся новейшими научными разработками, озвучивают тенденции и определяют векторы развития отрасли.

Выставка предлагает разнообразие отечественного и зарубежного оборудования и программного обеспечения в области неразрушающего контроля, технической диагностики, мониторинга состояния и оценки ресурса.

Уже подтвердили свое участие более 10 отечественных компаний-производителей, среди которых Константа, НИИИН МНПО «Спектр», ЭХО+, АКС, Тессоникс, Синтез НПФ, ИТС, НУЦ Контроль и диагностика, Интерюнис-ИТ, Алькор, Техно-НДТ и другие.

В эти же даты в Экспоцентре будет проходить выставка «Нефтегаз 2025».

Для наиболее комфортной и продуктивной презентации вашего оборудования мы предлагаем стенды различной комплектации. Выбрать стенд, а также место на выставке вы можете на сайте Форума.

По вопросам сотрудничества обращаться по телефону: +7(499) 245-56-56 или электронной почте info@ronktd.ru

**Ждем Вас 14—16 апреля 2025 г. в Москве, ЦВК Экспоцентр, павильон 2.6.
Успейте забронировать стенд по выгодной цене!**

expo.ronktd.ru info.ronktd.ru [sankova@ronktd.ru](https://t.me/sankova@ronktd.ru)

+7(499)245-56-56

Уважаемые коллеги!



**ПРИГЛАШАЕМ ВАС ПРИНЯТЬ УЧАСТИЕ
И ВЫСТУПИТЬ С ДОКЛАДОМ
на XXV Петербургской научно-технической конференции
УЗДМ-2025 «Методология ультразвукового контроля:
фундамент и современные надстройки», посвященной
100-летию Анатолия Константиновича Гурвича
(2—23 мая 2025 г., Санкт-Петербург)**

Начата подготовка к научно-технической конференции УЗДМ-2025

Юбилейная XXV Петербургская научно-техническая конференция УЗДМ-2025 «Методология ультразвукового контроля: фундамент и современные надстройки», посвященная 100-летию Анатолия Константиновича Гурвича, состоится 23—25 мая 2025 года в Санкт-Петербурге. Организаторы УЗДМ-2025 — Научный центр мостов и дефектоскопии, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), при поддержке Секции «Физические неразрушающие методы контроля» научного совета по физике конденсированных сред РАН, Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД) и Национального Агентства Контроля Сварки (НАКС).

Конференция будет посвящена следующим темам

1. Методические особенности и аспекты применения ультразвуковых антенных решеток.
2. Технологические возможности ультразвуковых аппаратно-программных комплексов с визуализацией результатов в задачах стратегии цифровизации.
3. Фундаментальные принципы методологии в практике ультразвукового контроля при производстве и эксплуатации продукции металлургии и машиностроения, в атомной и тепловой энергетике, трубопроводном и железнодорожном транспорте.
4. Метрологическое обеспечение технологий ультразвукового контроля и диагностики (круглый стол).
5. Обучение, подтверждение квалификации, аттестация, сертификация... А результат? (круглый стол).

Форма работы на конференции — пленарные и секционные доклады, стендовые доклады, круглые столы и демонстрация оборудования.

Важные даты

Прием заявок до **15.02.2025 г.** Прием тезисов докладов до **15.03.2025 г.** Рассылка пригласительных билетов и программ до **10.05.2025 г.**

Культурная программа будет включать в себя экскурсии по дворцам и паркам Петергофа.

Регистрационный взнос без учета НДС для участников составляет 34 000 руб., для аспирантов — 16 000 руб., для сопровождающих (без участия в работе конференции) — 9 000 руб.

Место проведения

Санкт-Петербург, Отель «Новый Петергоф» (Петергоф, Санкт-Петербургский проспект, 34). Бронирование номеров осуществляется самостоятельно. Код для гарантированного приоритетного бронирования — «УЗДМ-2025». Контактные данные Оргкомитета: +7 (921) 938-43-13, uzdm2025@yandex.ru.