

## ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЕ МУАРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ В ПЛОСКОМ ПРОВОДНИКЕ С ТОКОМ НА ДЕФЕКТЕ В ВИДЕ ТРЕЩИНЫ

В.М. Иванов<sup>1</sup>, Г.А. Барышев<sup>2</sup>, А.В. Баранов<sup>1</sup>, Е.А. Печагин<sup>1</sup>

*Кафедры: «Электрооборудование и автоматизация» (1),  
«Материаловедение и технология конструкционных материалов» (2), ТГТУ*

*Представлена членом редколлегии профессором В.Ф. Калинин*

**Ключевые слова и фразы:** искажение полей; муар; электромагнитное поле.

**Аннотация:** В предлагаемой работе применение метода муаровых картин позволяет установить связь между величиной магнитного поля рассеяния и особенностями объекта, создающего это поле.

Предложенная методика наблюдения магнитных полей рассеяния с помощью муара позволяет сравнить их искажения на различных дефектах и проводить расчет напряженностей этих полей.

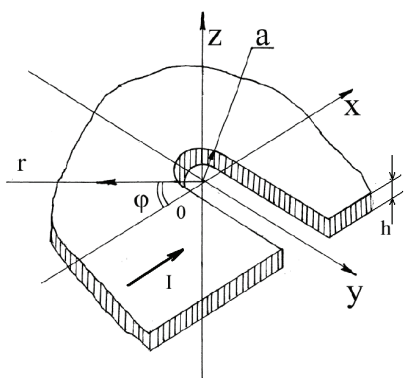
Прочность и долговечность проводников во многом зависит от наличия различных дефектов, наиболее опасным из которых является трещина. Наличие трещины не только повышает концентрацию механических напряжений, но и электромагнитных полей, которые создают значительные электродинамические усилия, иногда превышающие предел прочности материала. Известно [1], что усилия, создаваемые магнитным полем, пропорциональны квадрату его напряженности. Кроме того, для плоского проводника, используемого в печатных платах, с дефектом в виде трещины (рис. 1), существенным является нагрев, который при определенных условиях может привести к разрушению.

Возникающее неоднородное температурное поле можно описать с помощью линий изотерм, выражающихся зависимостью [2]:

$$T = \frac{\delta E^2}{\rho C} \cdot t, \quad (1)$$

где  $\rho, C$  – удельные плотность и теплоемкость,  $t$  – время, соизмеримое с характерным временем термической диффузии

$\tau = \frac{a^2}{\chi}$ , ( $\chi$  – коэффициент температуропроводности).



**Рис. 1** Плоский проводник печатных плат с дефектом в виде трещины, обтекаемой током

При выполнении условия  $t \leq \tau$  процесс изменения температуры можно считать адиабатическим, а температуру в окрестности отверстия определить через протекающий ток

$$T = \frac{I^2}{h^2 \delta \rho C r^2} \cdot t \quad (2)$$

При  $t = \tau$  температура считается по формуле

$$T = \frac{I^2 a^2}{h^2 \delta \rho C x r^2} \quad (3)$$

Энергия тепловыделения, достаточная для плавления проводника в зоне отверстия, пропорциональна квадрату критического тока

$$q_{\text{пл}} = \frac{T_{\text{пл}} \rho C x}{r^2} \quad (4)$$

и при  $r = a$  достигает максимальной величины.

Напряженность электрического поля тока вблизи дефекта будет зависеть от приложенного напряжения и определяться выражением

$$E = \frac{dU}{dl}, \quad (5)$$

где  $dl = r d\varphi$ .

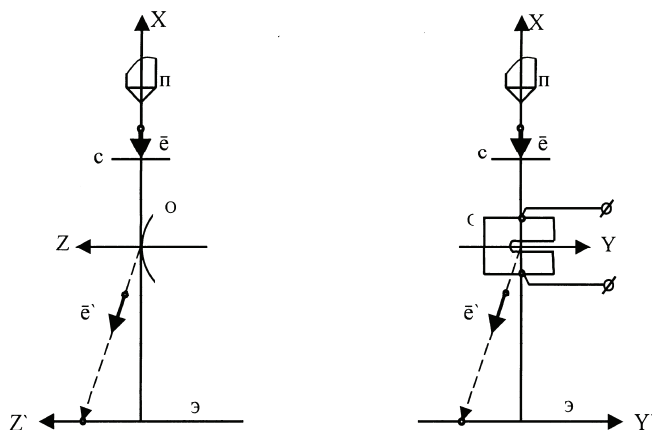
В результате распределение полного тока вдоль дефекта и напряженность электрического поля вокруг него:

$$I = Eh\delta r, \quad (6)$$

$$E = \frac{I}{h\delta r} = \kappa \frac{1}{r}, \quad (7)$$

где  $\kappa = \frac{I}{h\delta}$ .

Для плоских проводников с дефектами типа трещин, которые находятся под действием электрического тока, необходима оценка напряженности магнитного поля на контуре дефекта. Получить опытное значение традиционными методами измерений [3] затруднительно, а в ряде случаев невозможно из-за больших методических трудностей, связанных с геометрическими параметрами дефекта, а также малой протяженностью действия этого поля.



**Рис. 2** Электронно-оптическая схема эксперимента:

п – электронная пушка; с – металлическая сетка;

о – образец (пластина с трещиной); э – экран электронографа

Поэтому более обоснованным является использование средств электронной микроскопии с целью получения электронно-оптического муара [4].

В качестве модели плоского проводника печатных плат была использована медная пластина с трещиной, которая помещалась в колонну электронографа ЭГ – 100А.

Исследования проводились с минимальным ускоряющим электроны напряжением 40 кВ. Образец (80×80×1) с трещиной помещали в колонне так, чтобы пучок электронов скользил по его поверхности и был максимально приближен к вершине трещины (рис. 4). Муаровый узор на экране электронографа возникал в результате наложения неискаженного и искаженного полем изображения сетки. На рис. 3 представлены теневые электронно-оптические муаровые изображения образцов с краевой ( $l = 3$  мм;  $l = 40$  мм;  $l = 41,8$  мм) трещиной при радиусах закругления при вершине  $a = 0,15$  мм.

Для количественного анализа магнитного поля в вершине трещины по величине смещения электронного пучка на экране воспользуемся уравнением движения заряженной частицы по оси  $Y$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{e}{m} V_0 \mu_0 H_z, \quad (8)$$

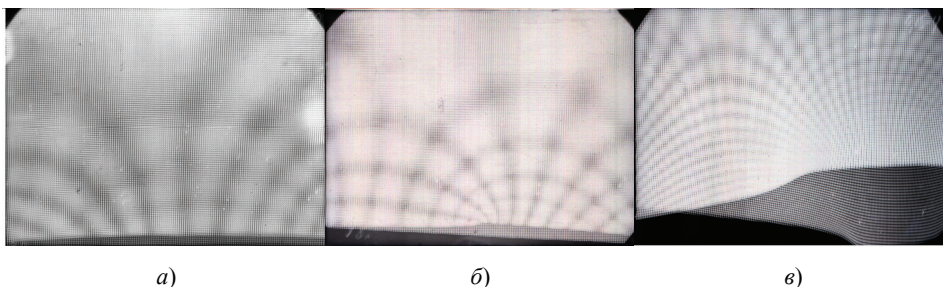
где  $V_0$  – скорость разгона частицы;  $H_z$  – напряженность магнитного поля вокруг трещины;  $e$ ,  $m$  – заряд и масса электрона;  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Используя равенство  $dx = V_0 dt$  с учетом  $y = V_y \frac{L}{V_0}$ , где  $L$  – расстояние от образца до экрана, окончательно имеем

$$y = \frac{e}{m} \frac{L}{V_0} \int H_z dx, \quad (9)$$

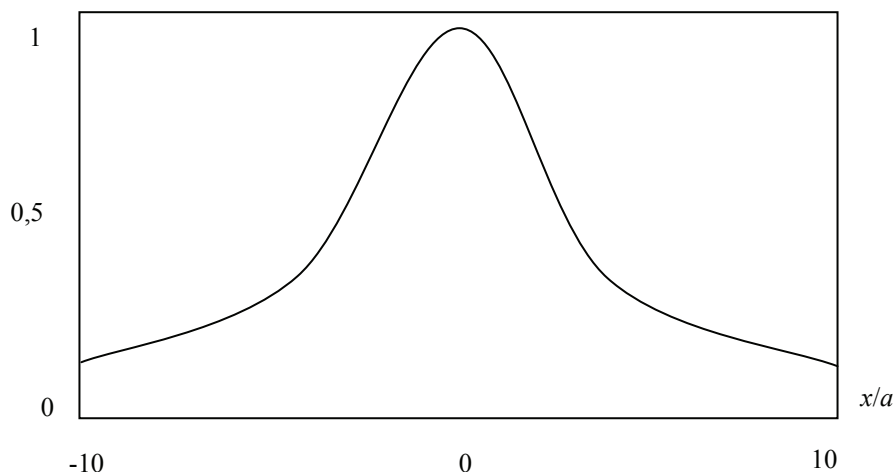
где  $V_0 = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$ ;  $U$  – ускоряющее напряжение.

Чтобы вычислить напряженность магнитного поля в вершине трещины, то есть найти его максимальное значение, необходимо задаться распределением  $H_z$  по оси  $X$  (рис. 4).



**Рис. 3 Электронно-оптический муар плоского проводника:**  
*a* – с центральной трещиной; *b*, *v* – с краевой трещиной

$H_z/H_{z \max}$



**Рис. 4** Зависимость  $H_z$  на поверхности образца от оси  $X$  в долях  $a$ , нормированная к максимальному значению  $H_{z \max}$

Аппроксимируем его уравнением

$$H_z(x) = \frac{10^2 I}{2\pi a} \left[ \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{z}{a}\right)^2}} \right] \left[ K(\varphi) + \frac{-\left(\frac{x}{a}\right)^2 + 1 - \left(\frac{z}{a}\right)^2}{1 - \left(\frac{z}{a}\right)^2 + \left(\frac{z}{a}\right)^2} E(\varphi) \right], \quad (10)$$

где  $I$  – ток, протекающий по пластине;  $a$  – радиус при вершине трещины;  $K(\varphi), E(\varphi)$  – эллиптические интегралы I и II-го рода; полутолщина пластины.

Отношение опытного и расчетного значений отклонения дает поправочный коэффициент в формуле (10)

$$\frac{y_0}{y_1} = \frac{1}{12}. \quad (11)$$

Таким образом, согласно эксперименту и выбранной расчетной модели элементарного витка с током, магнитное поле в вершине трещин выражается

$$H_z(x) = \frac{10^2 I}{2\pi \cdot 12 a} \left[ \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{z}{a}\right)^2}} \right] \left[ K(\varphi) + \frac{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{z}{a}\right)^2}{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{z}{a}\right)^2} E(\varphi) \right]. \quad (12)$$

Предложенная методика электронно-оптического муара позволяет изучать топографию магнитного поля, что может использоваться в радиоэлектронике для учета неоднородности электрического сигнала, искаженного концентрацией магнитного поля на дефектах. Кроме того, метод можно использовать в дефектоскопии, так как на дефектах магнитное поле искажается, и открывается возможность определения возникающего в области дефекта нагрева по электронно-оптическим муаровым изображениям.

### Список литературы

1. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972.
2. Барышев Г.А. и др. Действие импульсного электрического поля на малолигированной стали вблизи отверстий и неметаллических включений // Физика и химия обработки материалов. – 1980. – № 4. – С. 12 – 17.
3. Парселл Э.Н. Электричество и магнетизм. Берклевский курс физики. Т.2. – М.: Наука, 1975.
4. Гусев В.Н., Красюк Б.А. Наблюдение магнитных полей по теневым электронно-оптическим муаровым картинкам // Физика и химия обработки материалов. 1969. – № 5. – С. 40 – 46.

---

## Electronic Optical Moire Modeling of Energy Concentration Processes in Flat Conductor with Current on Crack-Shaped Defect

V.M. Ivanov<sup>1</sup>, G.A. Baryshev<sup>2</sup>, A.V. Baranov<sup>1</sup>, Ye.A. Pechagin<sup>1</sup>

*Departments: “Electrical Equipment and Automation” (1),  
“Material Engineering Science and Technology of Constructional Materials”, TSTU (2)*

**Key words and phrases:** fields distortion; moire; electromagnetic field.

**Abstract:** The application of moire pictures method suggested in the paper allows to determine the connection between the quantity of magnetic field scattering and peculiarities of the object creating this field. The methods of observation magnetic scattering fields with the help of moire allows to compare their distortion on the various flaws and calculate tension of these fields.

---

## Elektronenoptische Moire-Modellierung der Prozesse der Energiekonzentration in der Flachleiter mit dem Strom auf dem Defekt in der Form eines Risses

**Zusammenfassung:** Die Anwendung der Methode der Moirebilder in der vorgeschlagenen Arbeit erlaubt es, die Verbindung zwischen der Größe des Magnetfeldes der Streuung und den Besonderheiten des dieses Feld schaffenden Objekts festzustellen.

Die vorgeschlagene Methodik der Kontrolle des Magnetfeldes der Streuung mit Hilfe des Moires erlaubt es, ihre Verzerrungen auf den verschiedenen Defekten zu vergleichen und die Berechnung der Intensität dieser Felder durchzuführen.

---

## Modélage électronique et optique à moire des processus de la concentration de l'énergie dans un conducteur plat à courant électrique sur le défaut en forme de la fissure

**Résumé:** L'application de la méthode des images de moire permet d'établir la liaison entre la valeur du champ magnétique de la diffusion et les particularités de l'objet qui crée ce champ.

La méthode proposée de l'observation des champs magnétiques de la diffusion à l'aide de la moire permet de les comparer avec les déformations sur de différents défauts et d'effectuer le calcul des tensions de ces champs.