

УДК 621.3.4:537.533.35

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОВОДНИКА С ТРЕЩИНОЙ ПО ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИМ МУАРОВЫМ КАРТИНАМ

© В.М. Иванов, А.В. Лановая, А.А. Лозенков, Т.Н. Плужникова

Ivanov V.M., Lanovaya A.V., Lozenkov A.A., Pluzhnikova T.N. Research of the magnetic field of a conductor with a crack on electron-optical moiré patterns. Calculation of a magnetic field as plates with a crack by the method of electron-optical moiré is offered. The information criterion of estimation of heterogeneous magnetic fields in small volumes as a factor of a moiré pattern asymmetry is revealed. Dependence of this factor on the length of a regional crack in a flat conductor with a current is found. It is shown, that a change of the factor of a moiré pattern asymmetry around cracks is qualitatively similarly to a well-known distribution of electromagnetic energy in this area that can serve as a measure of estimation of the energy concentration around non-conducting defects.

В основе физики прочности и пластичности заложены структурно-чувствительные свойства твердых тел, которые реально формируются под действием полей различной физической природы, а время их жизни и эволюция сопровождаются воздействием внешних факторов, значительным из которых является электромагнитное поле. Наличие дефектов структуры в проводниках нарушает полевую симметрию и перераспределяет электрические и магнитные поля, локализуя их вокруг дефектной зоны. Разница в плотностях энергии по объему проводника может вызвать силовые, температурные, электрические и магнитные градиенты, зачастую приводящие материал к локальному деформированию и разрушению [1].

В связи с этим эффекты перераспределения, усиления, искажения и концентрации электромагнитного поля требуют обстоятельного изучения, в особенности механизмов разрушения, которые различаются тепловым и электродинамическим (пондеромоторным) действием на проводник. В обоих случаях значительную роль играет наведенное в проводнике и усиленное дефектом магнитное поле тока, которое формирует вокруг структурных и технологических неоднородностей механическое поле напряжений электромагнитного происхождения. Поэтому для оценки деформированного состояния и разрушения проводников с дефектами необходимо знать не только форму локального распределения магнитного поля, но и его численно-точную напряженность в локальной зоне.

Использование средств электронной микроскопии позволяет напрямую наблюдать топологию локальных магнитных полей малой протяженности и оценивать напряженность этих полей с помощью картин электронно-оптического муара [2].

В качестве опытных образцов использовались медные пластины размером  $80 \times 80 \times 1,0$  мм с острыми краевыми надрезами различной длины, которые имитировали трещины. Образец помещали в колонну электронографа ЭГ-100А так, чтобы пучок электронов скользил по поверхности и был максимально приближен к дефекту (рис. 1).

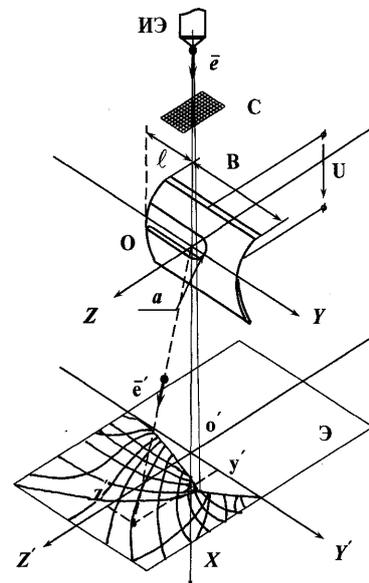


Рис. 1. Схема эксперимента (образец с трещиной): ИЭ – источник электронов; С – сетка; В – объект (изогнутая пластина с отверстием); Э – экран электронографа;  $\bar{e}$  – пучок электронов; U – напряжение источника

Магнитное поле возбуждалось пропусканием по образцу импульсов тока прямоугольной формы с различными амплитудами и скважностью, равную двум. Для формирования таких импульсов последовательно с источником тока включались контакты поляризованного реле, обмотка которого питалась от звукового генератора на частоте 30–50 Гц. Величина ускоряющего напряжения выбрана из условия получения на экране муаровых картин, содержащих необходимое для машинной обработки числа полос, и составляла 40 кВ. Результаты экспериментов показали значительное искажение магнитного поля пластины, содержащей трещину.

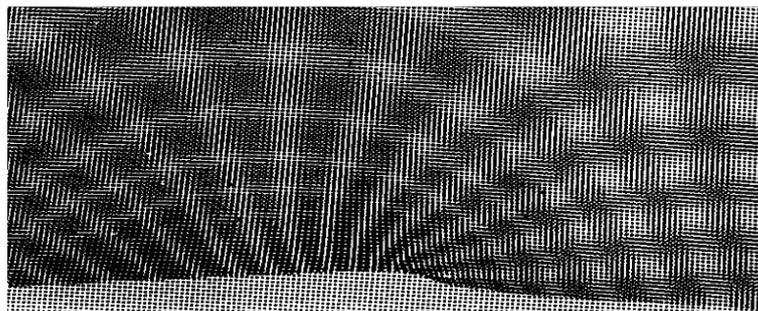


Рис. 2а. Муаровая картина магнитного поля пластины с трещиной

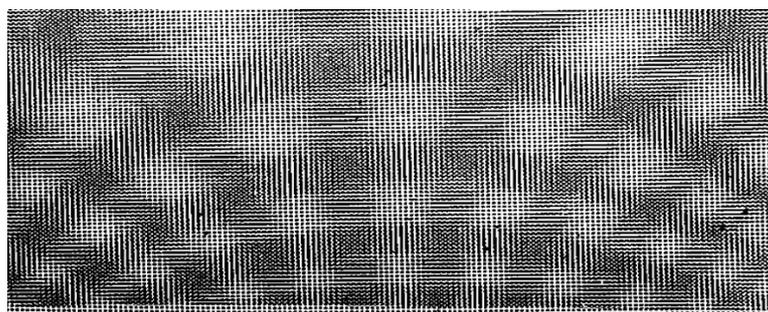


Рис. 2б. Муаровая картина магнитного поля бездефектной пластины при постоянном токе после фильтрации

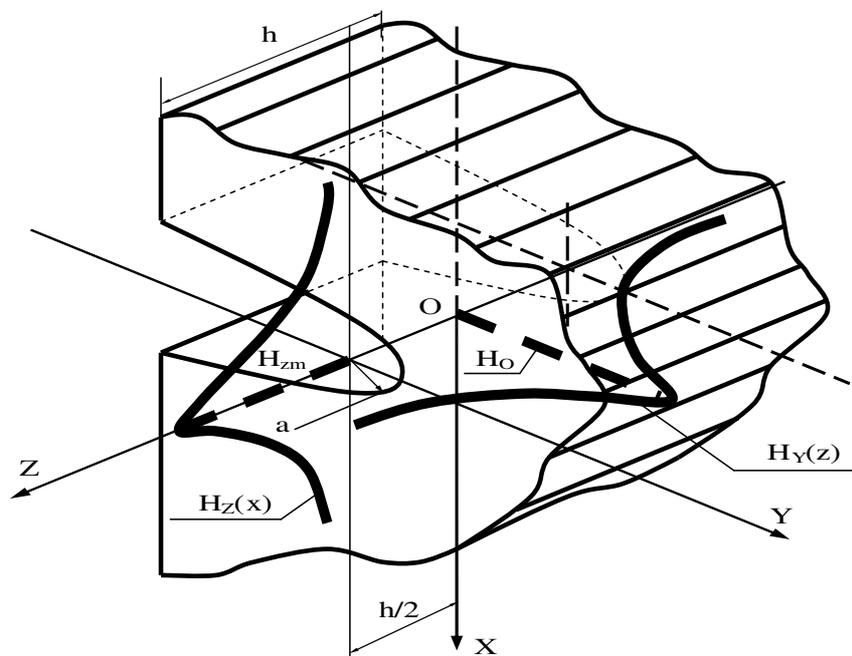


Рис. 3. Распределение магнитного поля вокруг вершины трещины:  $h$  – толщина пластины;  $a$  – радиус при вершине трещины; направление тока вдоль оси  $X$

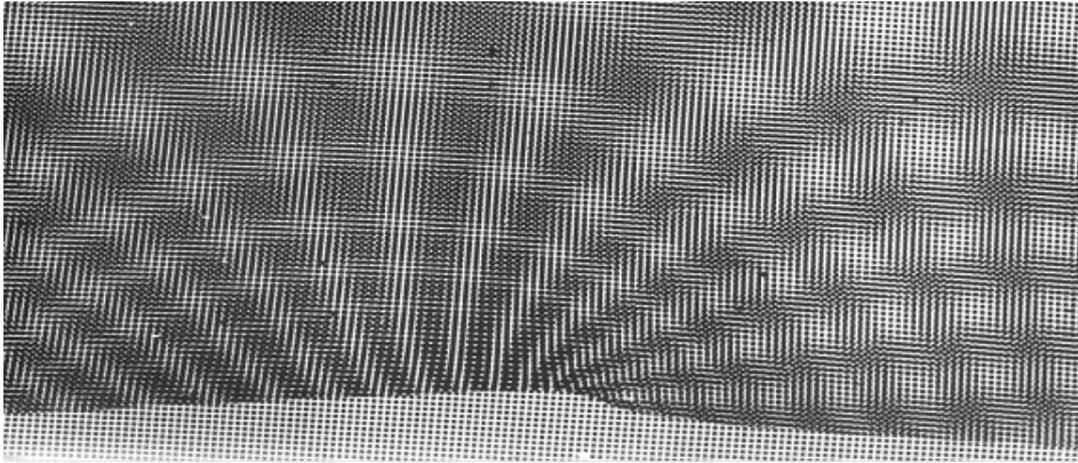


Рис. 4а. Муаровая картина магнитного поля пластины с трещиной  $l/b = 0,5$  при постоянном токе без фильтрация

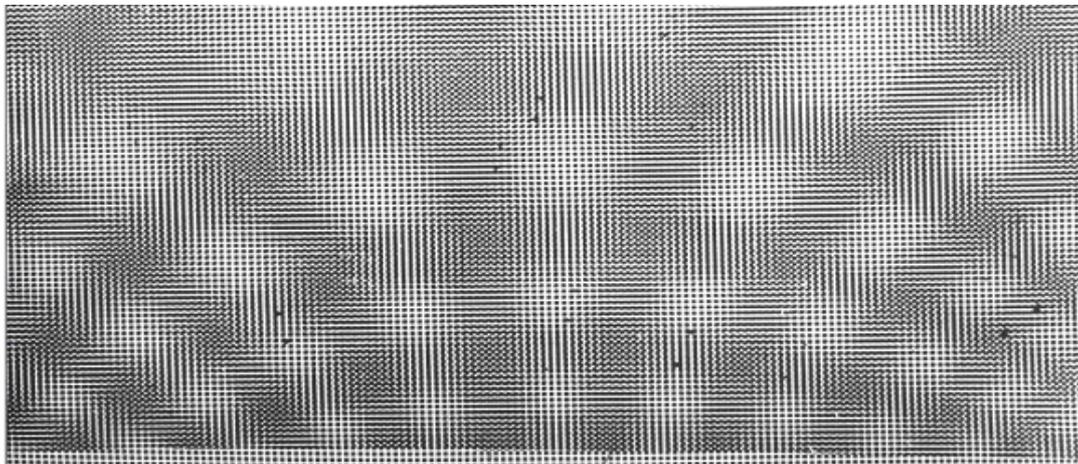


Рис. 4б. Муаровая картина магнитного поля бездефектной пластины при постоянном токе без фильтрация

Типичные картины муаровых полос, полученные на бездефектном образце-этalone и образце с острым краевым надрезом, показаны на рис. 2. Качественный анализ показывает, что искривление траектории электронов, движущихся вдоль оси  $X$ , обусловлено двумя составляющими магнитного поля пластины  $H_z$  и  $H_y$  (рис. 3).

Наибольший интерес представляет компонента  $H_z(x)$ , поскольку в вершине трещины она намного превышает остальные и контролирует процессы деформирования и разрушения проводника.

Проанализируем муаровую картину по отклонению электронов в направлении оси  $Y$  (рис. 3). Связь между этим отклонением и напряженностью магнитного поля в вершине трещины  $H_z$  можно установить, рассмотрев уравнение движения частицы вдоль этой оси:

$$\frac{dV_y}{dt} \cdot m = eV_0\mu_0 H_z(x). \quad (1)$$

Здесь  $V_0 = \left(\frac{2eU}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$  – скорость электронов в на-

правлении  $X$ ;  $e, m$  – заряд и масса электрона;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $U$  – ускоряющее напряжение. Заменяя  $dt$  на  $dx/V_0$  и проинтегрировав уравнение (1), получим:

$$V_y = \frac{e}{m}\mu_0 \int H_z(x) dx. \quad (2)$$

Вектор скорости электронов может измениться в магнитном поле только по направлению, но не по величине, поэтому в результате появления составляющей скорости вдоль оси  $Y$  проекция скорости на ось  $X$  уменьшается. Однако при небольших углах отклонения пучка, которые имеют место в эксперименте, этим эффектом можно пренебречь. Тогда отклонение пучка магнитным полем на экране электронографа можно рассчитать по формуле:

$$y' = V_y \frac{L}{V_0} = \frac{e}{m} \mu_0 \frac{L}{V_0} \int H_z(x) dx, \quad (3)$$

где  $L$  – расстояние между образцом и экраном, равное 0,4 м.

Из выражения (3) видно, что отклонение пучка пропорционально интегралу от измеряемого поля по направлению пролета электронов. Такое же выражение будет справедливо и для отклонения  $Z$ , создаваемого компонентой поля  $H_y(x)$ :

$$z' = \frac{e}{m} \mu_0 \frac{L}{V_0} \int H_y(x) dx. \quad (4)$$

Именно поэтому, несмотря на то, что в вершине трещины отклонения пучка по осям  $Y$  и  $Z$  соизмеримы,  $H_z \gg H_y$ . Это объясняется большей протяженностью области, где  $H_y$  заметно отличается от нуля.

Для определения максимального значения  $H_z(x) = H_{zm}$  необходимо задать распределение напряженности магнитного поля вдоль оси  $X$ , которое бы достаточно точно аппроксимировало действительное и вместе с тем допускало точное интегрирование. Обычно в таких случаях, например, при расчете коротких магнитных линз используют функцию, описывающую колоколообразное распределение:

$$H_z(x) = \frac{H_{zm}}{1 + \beta x^2}. \quad (5)$$

Экспериментально установлено, что на расстоянии  $x = 100a$  от кончика трещины (здесь  $a$  – радиус закругления в ее вершине) искажения, вносимые в муаровый узор трещиной, не проявляются. Полагая, что на краях этого интервала значение напряженности поля падает до 1% от максимального, получим расчетную формулу:

$$H_z(x) = \frac{H_{zm}}{1 + \left(\frac{x}{10a}\right)^2}. \quad (6)$$

Подставив численные данные и распределение (6) в уравнение (3) и проинтегрировав его, получим простое расчетное соотношение между отклонением пучка электронов  $y'$  и  $H_{zm}$ :

$$y' = 2,25 \cdot 10^{-2} H_{zm} \cdot a. \quad (7)$$

Отклонение пучка в направлении  $Y$  измеряется по муаровой картине, которое определяется произведением номера полосы на размер ячейки в изображении неискаженной сетки (эталоны). Отсчет количества полос обычно производят от некоторой фиксированной, называемой нуль-полосой, где  $H_z = 0$ . Следует отметить, что формула (7) дает величину напряженности магнитного поля на поверхности плоского проводника, т. е. при  $z = \pm \frac{h}{2}$  ( $h$  – толщина пластины). В боль-

шинстве проводников  $h \gg a$ . В этом случае распределение поля  $H_y(z)$  по толщине пластины подобно распределению в длинном соленоиде, и поле в центре пластины ( $z = 0$ ) вдвое превышает поле на поверхности (рис. 3).

Анализ муаровых картин показал, что на бездефектных пластинах муаровый узор симметричный с меньшим количеством полос при неизменном токе и с большей их размытостью по сравнению с узорами от дефектных образцов. В связи с этим необходимо выявить определенные критерии оценки муаровых картин, которые явно будут свидетельствовать о наличии дефектов в проводниках. Здесь целесообразно применить машинную обработку муаровых картин с применением вычислительной техники. Но прежде чем компьютер сможет перейти к вычислению тех или иных критериев, необходимо перевести муаровые картины в черно-белый формат, т. е. перед машинной обработкой требуется фильтрация этих изображений. Это связано с подсчетом количества черных и белых пикселей, которые, как выяснилось, могут служить критерием дефектности образцов.

Количество черных и белых пикселей на муаровых картинах для бездефектных образцов примерно одинаково. Муаровые картины образцов с дефектами давали большую разницу в массивах черных и белых пикселей, причем она была тем сильнее, чем более искаженный муаровый узор. Характер искажений для дефектов различной геометрии также отличается и связан определенной асимметрией муаровых картин. В связи с этим можно утверждать, что коэффициент асимметрии  $K_a$  муаровых картин тем больше, чем опаснее и протяженнее дефект. Значение  $K_a$  определяется простым отношением количества черных пикселей в областях искаженного фильтрованного муарового узора к количеству этих пикселей на картине для бездефектного образца (рис. 4, а, б):

$$k_a = \frac{P_a}{P_0}, \quad (8)$$

где  $P_a$  – количество черных пикселей на искаженной локальным полем муаровой картине;  $P_0$  – количество черных пикселей на муаровой картине бездефектного образца.

Следует отметить, что муаровая картина обрабатывается лишь в той области, где узор наиболее искажен, т. е. во всех экспериментах по центру изображения. Это исключает вмешательство муаровых полос на периферии и, следовательно, значительно снижает вклад краевого эффекта на значения  $K_a$ .

Результаты вычислений  $K_a$  при машинной обработке муаровых картин от магнитных полей проводников с острым краевым надрезом – трещиной представлены на рис. 5.

Приведенные зависимости указывают на то, что выбранный критерий усиления магнитного поля в виде коэффициента асимметрии муаровой картины может служить мерой оценки концентрации электромагнитной энергии вокруг непроводящих дефектов (отверстия, трещины).

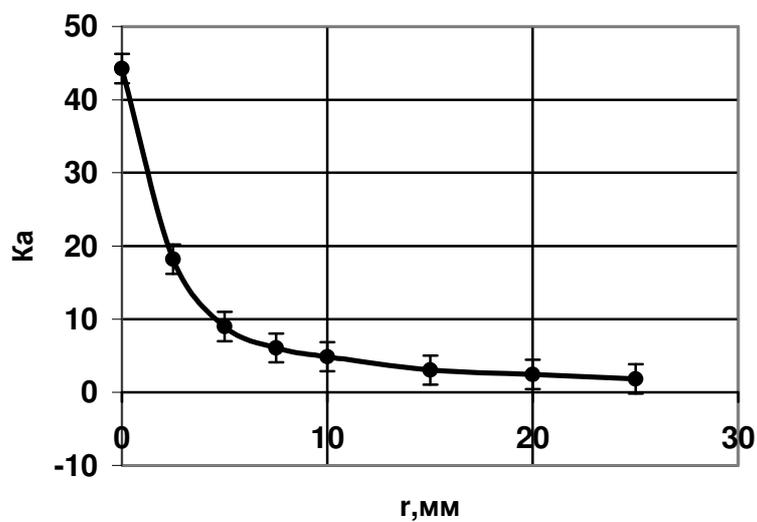


Рис. 5. Острый надрез-трещина с вершиной в центре проводника,  $j = \text{const}$ ,  $a = 0,025$  мм (радиус трещины)

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Головин Ю.И., Иванов В.М., Китерман В.А. Механизмы разрушения металлов с трещинами под действием электромагнитного поля // Физика и химия обработки материалов. 1983. № 6. С. 48-52.
2. Иванов В.М., Печегин Е.А., Уваров А.Н. Исследование концентрации энергии в области непроводящих включений плоского про-

водника с током средствами электронной микроскопии // Электрика. 2003. № 7. С. 34-37.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №05-01-00759).

Поступила в редакцию 5 декабря 2006 г.