

Г. В. СПИВАК, Н. Г. КАНАВИНА, И. Н. ЧЕРНЫШЕВ и И. С. СБИТНИКОВА

## ОБ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОМ МЕТОДЕ ОТОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ С МАГНИТНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

*(Представлено академиком П. А. Ребиндером 21 VII 1953)*

В настоящей работе описывается метод наблюдения объектов, содержащих магнитные неоднородности, локализуемые на катоде эмиссионного электронного микроскопа. Так как магнитные свойства ферромагнетиков при нагревании исчезают еще до появления термоэмиссии, необходимой для отображения, то нами применялся холодный катод. Электронная эмиссия отображаемого электрода вызывалась или ионной бомбардировкой в газе или же за счет вторичной эмиссии, создаваемой в вакууме первичным пучком электронов. В эмиссионном микроскопе основным фактором, обеспечивающим формирование изображения холодного шлифа, является влияние геометрических неровностей катода. Эти неровности создают у поверхности электрические микролинзы, вызывающие дополнительную фокусировку электронов, что и обеспечивает контраст картины.

В основе предлагаемого нами метода лежит представление о том, что существует возможность создания контраста также и за счет магнитных «микролинз», созданных неоднородностями намагничивания, распределенных по поверхности катода. Примененные нами системы эмиссионных электронных микроскопов были двух типов: 1) газоразрядный микроскоп, 2) вторично-эмиссионный микроскоп. Первый тип был аналогичен разработанному нами ранее (1). Исследуемый образец служил катодом и крепился на молибденовом вводе, впаянном в шлиф. Анодом в большинстве экспериментов служил латунный цилиндр, который мы располагали на расстояниях 5—10 мм от катода. Изображения катодов получались при помощи панцирной магнитной линзы при напряжениях порядка 8—12 кв, обычно при давлениях порядка  $10^{-3}$ — $10^{-2}$  мм рт. ст. Линза одновременно и намагничивала исследуемый объект.

Несмотря на простоту электронно-оптического устройства, применение газового разряда в эмиссионном микроскопе не во всех случаях удобно. Вследствие большого аномального катодного падения потенциала электроны быстро приобретают большие скорости, что понижает чувствительность к магнитным полям на катоде. Поэтому был осуществлен переход к получению изображения магнитных неоднородностей вторичными электронами с катода. Эмиссионный микроскоп этого типа показан на рис. 1. Катод  $K_1$  обстреливался электронами малых скоростей при помощи пушки 2. Вторичные электроны с него ускорялись до нескольких киловольт и фокусировались панцирной магнитной линзой 3, которая одновременно намагничивала объект. Анодом служило аквадаговое покрытие 4.

Изображение объекта, имеющего магнитные включения в немагнитной среде, осуществлялось следующим образом. Объект — катод, создающий неоднородности магнитного поля, был изготовлен в виде спирали из двух сложенных вместе тонких лент: нике-

левой толщиной в 0,1 мм и медной в 0,3 мм. Спираль плотно спрессовывалась, потом отображаемая торцевая поверхность полировалась. Полученное в газоразрядном микроскопе изображение хорошо выявляет периодичность в магнитной структуре катода, что видно из рис. 2.

Так как, помимо влияния неоднородностей магнитного поля, показанного на рис. 2, могли сказываться эффекты, вызванные разной эмиссионной способностью никеля и меди, а также могли влиять геометрические неровности поверхности, то были приняты меры к устранению возможного влияния указанных эффектов. С этой целью катод был закрыт плотно прилегающей к нему алюминиевой фольгой толщиной 0,01 мм. Влияние вариации геометрических неровностей поверхности и неравномерности

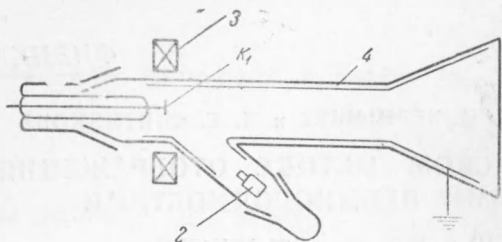


Рис. 1. Вторично-эмиссионный электронный микроскоп

эмиссии этим исключалось. Периодичность в изображении полос полностью сохранилась, хотя резкость картины несколько уменьшилась. При толщине фольги  $\sim 0,05$  мм изображение полос уже становилось едва заметным.

Фокусировка на магнитные или геометрические неоднородности проявляется в том, что изображение катода можно получить, фокусируя изображение на экране с двух разных плоскостей. Плоскость «объекта» для фокусировки магнитных неоднородностей лежит перед плоскостью фокусировки на геометрические неровности поверхности. Это и позволило получить изображение полос при закрытии образца фольгой. Можно получить, однако, второе изображение поверхности катода, фокусируя на геометрические неоднородности; полосы «магнитной» фокусировки при этом исчезают. То, что можно получить два разных типа изображений, вызвано тем, что одной и той же геометрической плоскости катода соответствуют разные плоскости фокусировки магнитных и электрических «микролинз», при этом электрическими «микролинзами» являются геометрические неоднородности. В свою очередь, при фокусировке на геометрические неоднородности возможно получение светлопольного и темнопольного изображения, что весьма характерно для этого вида фокусировки. В случае же фокусировки на плоскость магнитных неоднородностей наблюдается появление лишь одного нового изображения, причем темнопольного. Так как теперь отображаемая плоскость находится перед поверхностью катода в области расходящегося потока магнитных силовых линий, то в этом месте электронные траектории становятся расходящимися и формируют темнопольное изображение.

На рис. 3 а отображены нашим методом неоднородности магнитного поля, имеющие произвольную форму. Это железные опилки, впаянные в свинец. Как видно из фотографии, их форма хорошо передается, причем изображение получается темнопольным, так как электроны расходятся от области сильного магнитного поля. Отображение того же объекта, но при фокусировке на геометрические неоднородности, показано на рис. 3 б. Этот рисунок является иллюстрацией к сказанному выше о двух плоскостях фокусировки.

Получение изображения объекта с неоднородным намагничиванием может быть осуществлено с помощью катода, изготовленного прежним способом, но покрытого не алюминием, а тонкой пленкой ( $\sim 0,02$  мм) ферромагнетика (никеля). В этом случае неоднородность магнитной структуры подложки вызывает неравномерное намагничивание никелевого покрытия. Рис. 4 отражает эту неравномер-



Рис. 2. Выявление магнитных неоднородностей,  $\times 30$

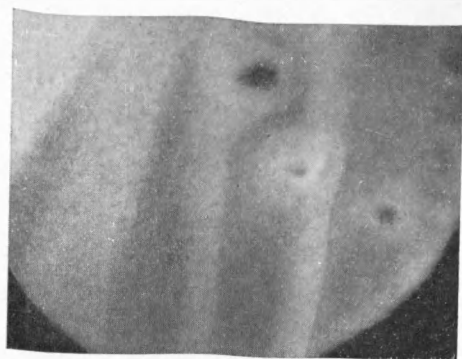
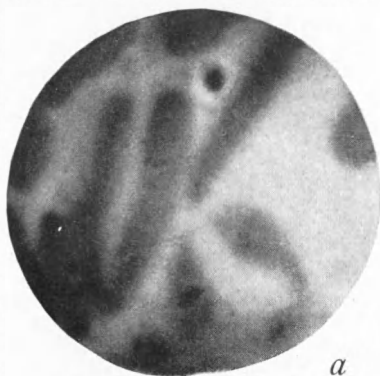
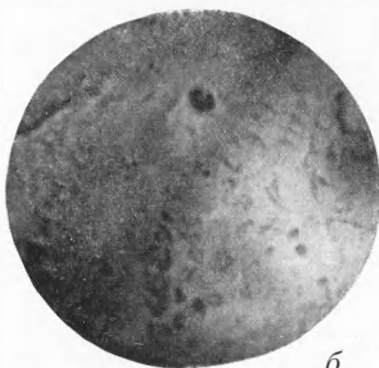


Рис. 4. Распределение намагниченности по поверхности объекта,  $\times 40$



*a*



*б*

Рис. 3. *a* — отображение магнитных неоднородностей,  $\times 25$ ;  
*б* — отображение геометрических неоднородностей поверхности,  $\times 25$

К статье А. М. Шухтина, стр. 553

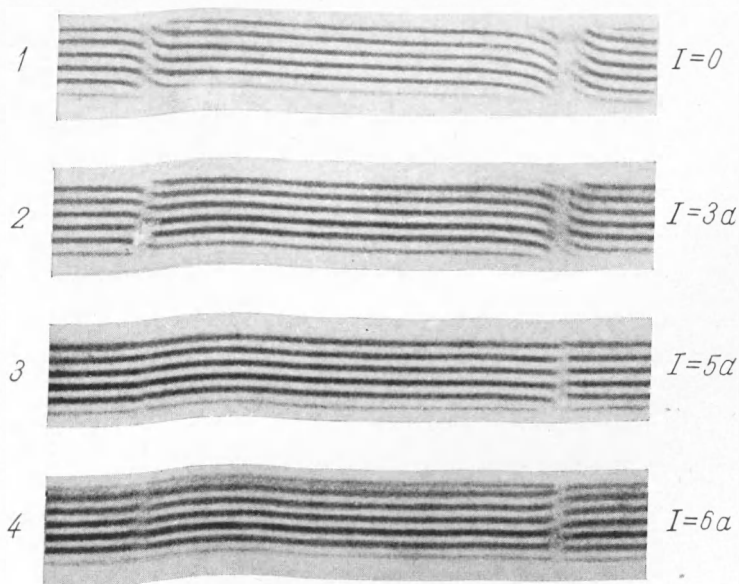


Рис. 1

ную намагниченность. При фокусировке на геометрические неровности поверхности никелевого покрытия полос не заметно. Отметим, что изображение (рис. 4) получилось несколько размытым. Это объясняется способом намагничивания никелевого покрытия, который не позволяет получить резких границ магнитных неоднородностей. Мы видим, что предложенный нами метод позволяет электронно-оптическим путем (рис. 2, 4) фиксировать распределение намагниченности в плоскости объекта.

Отличие предлагаемого метода от метода Мартона<sup>(2)</sup> и связь с методом свилей Теплера<sup>(3)</sup>. В методе Мартона применялся просвечивающий электронный микроскоп, в котором использовался однородный пучок электронов, созданный осветительной системой микроскопа; наблюдалось возмущение траекторий электронов намагниченным краем объекта, но сам «магнитный» объект не отображался (рис. 3 работы<sup>(2)</sup>), хотя Мартоном и был применен метод темного поля Теплера. Причиной неудачи явилось то, что в электронной оптике в объеме микроскопа имеет место плавное изменение показателя преломления, в то время как в обычной оптике резко меняется показатель преломления. В этом случае метод свилей хорошо отображает границы возмущающих неоднородностей.

В. С. Вавилов<sup>(4)</sup> применил также просвечивающий микроскоп к изучению внутреннего фотоэффекта по методу свилей. Далее, Мартон вынужден был для фиксации состояния среды одновременно с краем объекта проектировать и сетку. Размер ячейки сетки ограничивает разрешение. Искажения сетки косвенно, и то лишь в профиль, передают форму магнитной неоднородности. Это — основной недостаток работы Мартона, который сильно ограничивает ее возможности. Метод Мартона не обеспечивает должным образом визуализации магнитных неоднородностей. Этот метод представляет непосредственный перенос способа Теплера в электронную оптику за счет применения темного поля или наблюдения искажения изображения сетки. В нашем методе применяется эмиссионный микроскоп, дающий изображение не края объекта, а самой магнитной неоднородности по всей поверхности катода, что является существенным преимуществом. Кроме того, магнитными неоднородностями модулируются медленные электроны, выходящие из катода, что важно для чувствительности метода (рис. 2). На катоде, естественно, создается резкое изменение показателя преломления, позволяющее видеть границы области намагниченности.

В качестве оптической аналогии предлагаемому нами методу соответствовал бы метод свилей Теплера в том случае, если бы оптическими неоднородностями, помимо линзы, модулировался еще и источник света. Наличие двух плоскостей фокусировки (магнитные и геометрические неоднородности) является аналогом методу темного поля, позволяющему избавиться от излишнего света.

Для фиксации магнитных неоднородностей с успехом был применен метод ферромагнитных порошков<sup>(5)</sup>. Однако возможности этого метода ограничены случаями изучения статического намагничивания и разрешением оптического микроскопа.

Предлагаемый нами электронно-оптический метод может быть применен для изучения как статики, так и динамики процессов намагничивания.

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова

Поступило  
9 VII 1953

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Г. В. Спивак, Р. А. Лукацкая, Изв. АН СССР, сер. физ., 15, 434 (1951).  
<sup>2</sup> L. Marton, S. H. Lachenbruch, J. Appl. Phys., 29, 1171 (1959).  
<sup>3</sup> А. Тоерлер, Ostwalds Klassiker, № 157—158 (1906).  
<sup>4</sup> В. С. Вавилов, ЖТФ, 22, 10, 1644 (1952).  
<sup>5</sup> Н. С. Акулов, М. В. Дехтяр, Ann. d. Phys., 15, 750 (1952);  
Н. И. Еремич, Изв. АН СССР, сер. физ., 16, № 6 (1952).