

В. А. ЯКОВЛЕВ

## ОБ ОБРАТИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

В статье дается объяснение обратимости и необратимости температурных изменений анизотропии на основе тензора деформации; приведен экспериментальный материал, подтверждающий данное объяснение.

Изучение зависимости магнитной анизотропии тонких ферромагнитных пленок от температуры тесно связано с природой этой анизотропии. В настоящее время основные экспериментальные данные объясняются наличием в пленках двух видов анизотропии [1, 2]: 1) анизотропии направленного упорядочения пар атомов железа и 2) анизотропии, вызванной магнитострикцией и механической связью пленки с подложкой, которую в дальнейшем будем называть стрикционной. (Речь идет о пленках, полученных вакуумным распылением при нормальном падении молекулярного пучка на подложку.) Последний вид анизотропии, как и анизотропия наклонного напыления, является характерным для пленок. Это — один из видов наводимой намагниченностью анизотропии, механизм образования которой действует и в отсутствие магнитного поля.

Несколько слов об этой анизотропии. До появления работы Веста [1], выполнившего расчет ее с учетом поликристаллического строения пленки, делались попытки оценить количественно анизотропию этого вида с помощью изотропной магнитострикции  $\lambda$ . Они были основаны на некоторых допущениях относительно вида механических напряжений в пленках и поэтому носили приближенный и частный характер. Примером такого направления служит работа Блэйдса [3].

Однако, считая пленку изотропным телом, можно вычислить величину указанной анизотропии совершенно строго, не прибегая к помощи других упрощающих предположений. На рис. 1 пунктиром показана форма, которую стремится принять пленка при отклонении магнитного вектора на угол  $\varphi$  от направления легкого намагничивания (ось  $x$ ). Поскольку форма пленки жестко задана для всех углов (сплошная линия), можно вычислить энергию упругих напряжений с помощью тензора деформации.

Пленка приводится к первоначальной форме двумя последовательными деформациями: пунктирный эллипс превращается в круг, затем круг растягивается в эллипс, показанный на рисунке сплошной линией.

В дальнейшем через  $\lambda_0$  обозначается магнитострикция, соответствующая температуре напыления, а через  $\lambda$  — магнитострикция в момент измерения.

Тензор деформации можно представить в виде суммы двух тензоров

$$A_{\alpha\beta} = A'_{\alpha\beta} + A''_{\alpha\beta}.$$

Компоненты первого тензора в системе  $ox'y'$  равны

$$A'_{x'x'} = -\lambda, \quad A'_{y'y'} = \frac{\lambda}{2}, \quad A'_{x'y'} = 0.$$

Компоненты второго тензора в системе  $oxy$ :

$$A''_{xx} = \lambda_0, \quad A''_{yy} = -\frac{\lambda_0}{2}, \quad A''_{xy} = 0.$$

Определяем компоненты первого тензора в системе  $oxy$ :

$$A'_{xx} = A'_{x'x'} \cos^2 \varphi + A'_{y'y'} \sin^2 \varphi = -\lambda \cos^2 \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin^2 \varphi,$$

$$A'_{yy} = A'_{x'x'} \sin^2 \varphi + A'_{y'y'} \cos^2 \varphi = -\lambda \sin^2 \varphi + \frac{\lambda}{2} \cos^2 \varphi.$$

$$A'_{xy} = (A'_{y'y'} - A'_{x'x'}) \sin \varphi \cos \varphi = \frac{3}{2} \lambda \sin \varphi \cos \varphi.$$

Суммируя соответствующие компоненты в системе  $oxy$ , получаем

$$A_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \lambda_0 + \frac{\lambda}{2} \sin^2 \varphi - \lambda \cos^2 \varphi + \frac{3}{2} \lambda \sin \varphi \cos \varphi & \\ \frac{3}{2} \lambda \sin \varphi \cos \varphi & -\frac{\lambda_0}{2} - \lambda \sin^2 \varphi + \frac{\lambda}{2} \cos^2 \varphi \end{bmatrix}.$$

Зная тензор деформации и свойства материала, можно вычислить упругую энергию

$$W = \frac{1}{2} \Lambda (A_{xx} + A_{yy})^2 + \mu (A_{xx}^2 + A_{yy}^2 + 2A_{xy}^2),$$

где  $\Lambda$  и  $\mu$  — коэффициенты Ламе:

$$\Lambda = \frac{E\sigma}{(1-\sigma)(1-2\sigma)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}.$$

Здесь  $E$  и  $\sigma$  — модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно. В результате вычислений получается

$$W = \frac{E}{1+\sigma} \left[ \frac{5-9\sigma}{8(1-2\sigma)} (\lambda - \lambda_0)^2 + \frac{9}{4} \lambda \lambda_0 \sin^2 \varphi \right].$$

Это выражение, в отличие от формулы Веста, является приближенным, но дает хорошо согласующиеся с опытом цифры для пленок с отрицательной магнитострикцией (богатых никелем).

Как известно, стрикционная анизотропия объясняет ряд важных фактов, таких, как величина обратимых температурных изменений константы анизотропии или временные эффекты (например, поворот оси анизотропии в магнитном поле), в частности, энергия активации этих эффектов [4].

Эта анизотропия не связана с наличием или отсутствием механических напряжений в пленке в размагниченном состоянии. Эти напряжения либо незначительны, либо равны нулю (при  $\lambda = \lambda_0$ ); однако константы стрикционной анизотропии имеют большую величину. Следовательно, пытаясь обнаружить напряжения, например, методом колец Ньютона, нужно изучать прогиб подложки в поле, приложенном вдоль оси трудного намагничивания.

В дальнейшем попытаемся объяснить возникновение обратимости и необратимости в температурных изменениях анизотропии пленок, исходя из существования стрикционной анизотропии.

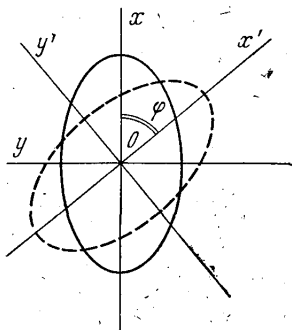


Рис. 1

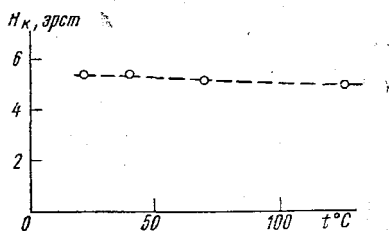


Рис. 2

Пусть пленка нагревается или охлаждается в отсутствие магнитного поля. Предположим, что она может принимать форму, соответствующую магнитострикции при данной температуре, но встречает при этом сопротивление типа вязкого трения. Поскольку при стрикционных изменениях формы поперечная деформация по абсолютной величине в два раза меньше продольной, площадь пленки будет меняться, и знак приращения ее будет совпадать со знаком приращения продольного размера пленки. Иначе говоря, площадь пленки увеличивается, если наибольший компонент плоского тензора напряжений, вызванных трением, отрицателен.

Но стремления пленки к расширению и стягиванию реализуются неодинаково. Если представить гибкий лист, лежащий на вязком основании, то становится очевидным, что стягиваться он может, если механические напряжения не превысят предел прочности (это условие выполняется для пленок), но стремление расширяться, увеличить площадь приведет только к образованию вздутий и складок. Еще более простой пример: тело, лежащее на плоскости и приводимое в движение привязанной к нему нитью. Натягивая нить, можно сдвинуть его с места, но передать ему движение в противоположном направлении, «толкая» нить, нельзя.

Это простое соображение приводит к следующим выводам. Поскольку стрикционная анизотропия в значительной степени определяется формой пленки, обратимость или необратимость ее изменений будет зависеть от того, в какой степени пленка восстанавливает свою форму после возвращения к исходной температуре. Если пленка при нагревании стремится расширяться, то это расширение полностью устраняется хорошо идущим обратным процессом сжатия при охлаждении, и будут наблюдаться обратимые температурные изменения анизотропии. Если же

пленка будет стягиваться, то можно ожидать необратимые изменения, так как обратный процесс расширения затруднен и идет медленно.

Ниже приводится таблица, в которой представлен характер ожидаемых изменений анизотропии пленок в зависимости от знака магнитострикции и температуры напыления.

Знак изотропной магнитострикции	Температура напыления	Ожидаемое изменение анизотропии при нагревании пленки
$\lambda > 0$	1. Комнатная 2. 300°C	необратимое уменьшение обратимое увеличение
$\lambda < 0$	3. Комнатная 4. 300°C	обратимое уменьшение необратимое увеличение

На рис. 2—4 представлены экспериментальные кривые соответственно для этих четырех случаев: первые две — для пленок, полученных распылением 79% пермаллоя; остальные две — для пленок из исходного

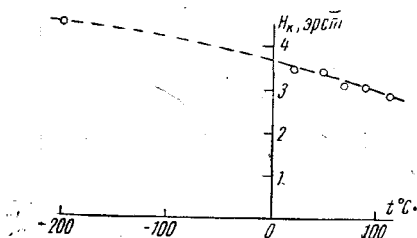


Рис. 3

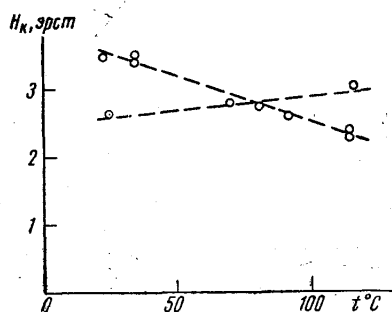


Рис. 4

сплава, содержавшего 89,5% никеля. Поле анизотропии измерялось с помощью прибора для наблюдения критических кривых на экране осциллографа [5]. Пленки нагревались в атмосфере до 100—130°C.

1. При первом нагревании пленки обнаружено необратимое уменьшение поля анизотропии на 14%. При последующих нагреваниях анизотропия менялась обратимо (спад равен 4—5% на 100°C).

2. У этой пленки поле анизотропии менялось обратимым образом. Спад в том же интервале примерно в три раза больше.

3. Необратимых изменений не наблюдалось. Обратимый спад равен 34%.

4. При первом нагревании — необратимое уменьшение составляло 40%. При повторных нагреваниях наблюдался незначительный обратимый рост.

Графики рис. 2 и 4 согласуются с таблицей. Более подробно нужно рассмотреть два других случая.

Необратимые изменения стрикционной анизотропии всегда больше обратимых (рис. 3). Поэтому увеличение стрикционной анизотропии может компенсироваться уменьшением константы анизотропии другого рода (вызванной направленным упорядочением), которая в данном случае преобладает [2].

Рис. 4 иллюстрирует случай, не объясненный в таблице. Из графиков видно, что у пленок из исходного сплава, содержащего 89,5% никеля, нет такой сильной зависимости величины анизотропии от температуры подложки при напылении, какая наблюдается у пленок с положительной магнитострикцией. Близость констант анизотропии, соответствующих комнатной и более высокой (300°C) температурам напыления, отмечалась и для никелевых пленок [2]. Можно сделать вывод, что это свойственно всем пленкам с отрицательной магнитострикцией, и объяснить это описанной выше моделью: если  $\lambda < 0$ , то при остывании после напыления пленка стягивается (процесс осуществляется полностью). В результате она примет форму, соответствующую комнатной температуре напыления.

Некоторая неопределенность здесь все-таки есть, поскольку пленка может иметь также любую промежуточную форму. Поэтому можно ожидать, например, необратимый рост анизотропии или обратимое уменьшение.

Затронутая тема, на наш взгляд, является довольно сложной. Изложенное позволяет объяснить: 1) наличие необратимых изменений поля анизотропии у пленок с  $\lambda > 0$  и  $t_{\text{напыл}} = 20^\circ\text{C}$ , 2) отсутствие этих изменений у пленок с  $\lambda < 0$  и  $t_{\text{напыл}} = 20^\circ\text{C}$ , 3) близость констант анизотропии пленок с  $\lambda < 0$ , полученных при разных  $t_{\text{напыл}}$  (20 и 300°C).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. West F. G. J. Appl. Phys., **35**, 6, 1827, 1964.
2. Телеснин Р. В., Сараева И. М., Рыбак, Шишков А. Г. «Изв. АН СССР», сер. физич., **30**, 1, 95, 1966.
3. Blades D. D. J. Appl. Phys., **30**, 260, 1959.
4. Тонкие ферромагнитные пленки под ред. проф. Р. В. Телеснина. М., «Мир», 1964, стр. 76.
5. Телеснин Р. В., Яковлев В. А. «Приборы и техника эксперимента», № 3, 1965.

Поступила в редакцию  
20.1 1968 г.

Кафедра  
общей физики для физиков