

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВЕЛИЧИНУ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ ТОНКИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК

В. А. ДЖИДАРЯН, А. А. ТРЧУНЯН

Рассматривается влияние внешних механических напряжений, приложенных вдоль или вблизи осей легкого (трудного) намагничивания ОЛН (ОТН), на коэрцитивную силу H_c тонких магнитных пленок толщиной 800—1000 Å с положительной магнитоупругой константой.

Показано, что зависимость H_c от упругих деформаций обусловлена характером перемагничивания пленки вдоль ОЛН.

За последнее время в литературе появились сообщения [1—5], посвященные магнитоупругим явлениям в тонких ферромагнитных пленках. Так в работах Кроутера [1], Митчелла и др. [2] дан теоретический анализ поведения поля анизотропии H_k под действием внешних напряжений. Авторы работы [3] рассматривают влияние внешних напряжений на доменную структуру. Пинч и Пинто [4] исследовали зависимость магнитных характеристик ТФП от внешних напряжений. Но в работе почти ничего не говорится о влиянии внешнего напряжения на величину коэрцитивной силы H_c при перемагничивании в направлении оси легкого намагничивания. Хотя работа [5] и посвящена рассматриваемому вопросу, однако, в ней представлены лишь результаты эксперимента.

Лесник, Левин, Каверина [6], исследуя влияние шероховатости подложки на величину H_c , теоретически нашли, что коэрцитивная сила прямо пропорциональна константе наведенной анизотропии. На рис. приведенном в [6] видно, что H_c линейно растет с увеличением ε , однако, эта зависимость имеет явно выраженный эффект насыщения, который не объясняется авторами.

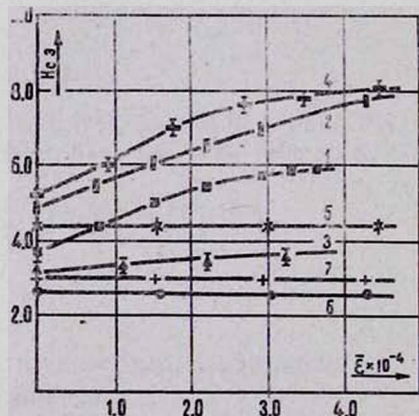


Рис. 1 Зависимость коэрцитивной силы от величины относительного удлинения (случай „а“).

Методика эксперимента

Тонкие ферромагнитные пленки изготавливались вакуумным напылением при вакууме $1-2 \cdot 10^{-5}$ тор на стеклянные подложки с размерами $18 \times 18 \times 0,15$ мм³ в форме дисков с диаметрами 10 мм. Температура подложки во время напыления составляла 200—250°C. Скорость

осаждения $100\text{--}150 \text{ \AA}/\text{мин}$. В направлении плоскости пленок прикладывалось магнитное поле величиной 50 э. Состав пленок колебался от 75 до 80% никеля и от 25 до 20% железа. Толщина определялась на интерферометре Линника и находилась в пределах $800\text{--}1000 \text{ \AA}$. Магнитные характеристики ТФП исследовались на феррографической установке, описанной в работе [7], с некоторыми изменениями. Частота перемагничивания составляла 600 ц/с. Магнитное поле создавалось парой катушек Гельмгольца; считывающая катушка имела форму восьмерки, что позволило просматривать как продольные, так и поперечные сигналы с пленки. Магнитное поле земли компенсировалось. Коэрцитивная сила определялась в минимальном поле раскрытия петли.

Упругие напряжения в пленке создавались при помощи деформирующего щупа, на который накладывалась нагрузка P . Стеклопластиковая подложка с пленкой помещалась в специальный лимб-держатель, на который она опиралась двумя противоположными краями шириной в 1 мм, и располагалась над измерительной катушкой. Угол поворота пленки определялся с точностью $\pm 0,5^\circ$. Щуп, имеющий форму ножа, плавно опускался на пленку и оказывал давление по всей длине в середине подложки, под действием чего она прогибалась. Если пленка находилась снизу, происходило растяжение, если сверху — сжатие. Поскольку при таком изгибе в пленке возникают неоднородные напряжения, а исследуемые пленки имели круглую форму, рассчитывалось среднее относительное удлинение $\bar{\epsilon}$ как среднее между максимальным относительным удлинением и относительным удлинением, отстоящим на 4 мм от линии деформации. Средняя величина относительного удлинения определялась по формуле

$$\bar{\epsilon} = \frac{P(1 - \mu^2)}{Eh^2}, \quad (1)$$

где P — вес щупа с разновесами; E , h , μ — соответственно модуль Юнга, принятый в расчете равным $7 \cdot 10^{11} \text{ дин}/\text{см}^2$, толщина и коэффициент Пуассона подложки. Как известно [8], при изгибающей деформации возникает также поперечное напряжение, равное $\sigma_y = \mu_1 \sigma_x$, поэтому выражение (1) умножалось на поправочный множитель $(1 - \mu_1)$, где μ_1 — коэффициент Пуассона магнитной пленки, равный 0,3, и в расчетах использовалась величина $\bar{\epsilon}_1 = \bar{\epsilon}(1 - \mu_1)$. Так как подложка имела квадратную форму, напряжения были направлены вдоль грани и составляли с легкой (трудной) осью намагничивания угол, равный углу скоса ОЛН. Исследовалось влияние растягивающих напряжений.

Таким образом, когда внешнее напряжение было приложено вдоль или вблизи ОЛН (ОТН), поле анизотропии H_k увеличивалось (случай „а“) или уменьшалось (случай „б“).

Результаты эксперимента и их обсуждение

Случай „а“ — влияние внешних напряжений, приложенных вдоль легкой оси или вблизи нее.

В таблице 1 приведены некоторые параметры тонких ферромагнитных пленок: величина коэрцитивной силы H_c , величина отношения H_c/H_k , дисперсия a_{80}^0 , угол скоса средней легкой оси относительно грани подложки φ^0 , магнитоупругий параметр η_t [2].

Наблюдения над различными образцами пленок показали, что под действием приложенного напряжения коэрцитивная сила для одних образцов пленок не изменяет своей величины, хотя пленки обладают значительной стрикцией, в то время как для других она увеличивается уже при незначительных напряжениях.

Таблица 1

№ об- разцов	Коэрцитив- ная сила H_c э	Величина H_c/H_k	Угол скоса φ^0	Дисперсия a_{80}^0	Магнито- упруг. пара- метр $\eta_t \times 10^3$ э
1	3,8	1,08	3,0	4,0	10,0
2	4,8	1,25	8,0	4,5	10,8
3	3,2	0,8	5,5	3,0	12,3
4	5,2	1,04	7,0	22,0	14,5
5	4,4	0,52	3,0	22,0	18,8
6	2,6	0,43	0	16,0	18,8
7	3,0	0,47	8,0	24,0	58,9

На рис. 1 показана зависимость коэрцитивной силы от относительного удлинения $\bar{\epsilon}_1$. Как видно, образцы пленок 5, 6, 7, хотя и обладают большой величиной магнитоупругого параметра η_t (табл. 1), но не изменяют величины коэрцитивной силы, тогда как H_c образцов пленок 1, 2, 3, 4 увеличивается с ростом относительного удлинения. Как показывает опыт, величина

$$\eta_t = \frac{dH_c}{d\epsilon}, \quad (2)$$

где dH_c — изменение коэрцитивной силы, соответствующее относительному удлинению $d\epsilon$, зависит от отношения H_c/H_k . Так как параметр H_c/H_k характеризует процесс переключения вдоль ОЛН, следовательно (H_c)_с тоже должна зависеть от него. У пленок с малым отношением H_c/H_k перемагничивание происходит смещением 180° границ [9]. Но если пленка по своим свойствам приближается к инверсной $H_c/H_k > 1$, в ней начинают проявляться также процессы вращения [10, 11]. Следует также отметить, что в пленках могут содержаться различные

неоднородности. В этом случае возможны более сложные процессы смещения границ, а также вращение вектора намагниченности в отдельных участках. Внешнее напряжение как раз и фиксирует такие аномалии при перемагничивании вдоль ОЛН, а величина

$$W = \frac{\eta_{\perp}}{\eta_{\parallel}} = \frac{dH_c}{dH_k} \quad (3)$$

в какой-то степени может служить их критерием.

На рис. 2 приведена зависимость W от начального отношения H_c/H_k при $\bar{\epsilon}_1 = 0$ для целого ряда пленок различного состава. Для величины $\eta_{\perp}$ принималось ее среднее значение. Разброс точек, по-видимому, связан с погрешностью в определении $\eta_{\perp}$ и с различной дисперсией анизотропии пленок.

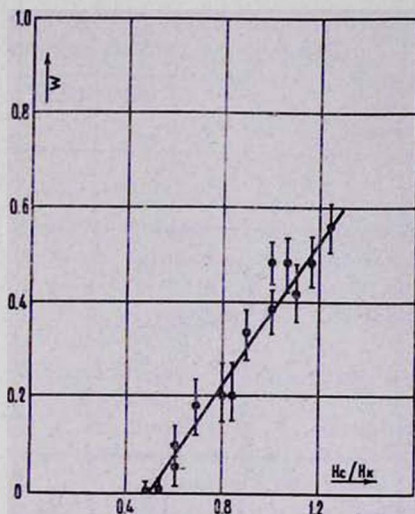


Рис. 2. Зависимость величины $W = dH_c/dH_k$ от отношения H_c/H_k .

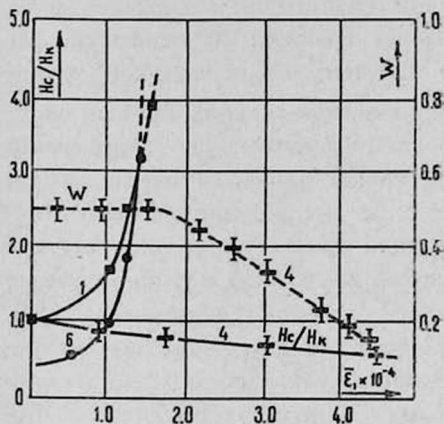


Рис. 3. Зависимость H_c/H_k и W от величины относительного удлинения.

Коэрцитивная сила смещения границ H_c менее чувствительна к внешним напряжениям, чем поле анизотропии H_k , поэтому под действием приложенных нагрузок величина отношения H_c/H_k изменяется. В зависимости от знака магнитострикции λ_s и напряжения σ , а также направления последнего, это отношение или уменьшается, или увеличивается. Следовательно, можно определять величину W уже на примере одной пленки. Действительно, если приложить возрастающее растягивающее напряжение по легкой оси для пленок с $\lambda_s > 0$, определив изменение коэрцитивной силы $(dH_c)_n = (H_c)_n - (H_c)_{n-1}$, соответствующее относительному удлинению $(d\epsilon)_n = \epsilon_n - \epsilon_{n-1}$, и изменение поля анизотропии $(dH_k)_n = (H_k)_n - (H_k)_{n-1}$, можно найти как W , так и новые значения отношения H_c/H_k .

На рис. 3 на примере образца № 4 показана зависимость величины отношения H_c/H_k и W от относительного удлинения. Пленка № 4 выбрана потому, что $(H_c)_0$ этой пленки почти достигает насыщения.

Можно заметить, что величина отношения H_c/H_k , а также величина W , падают с ростом относительного удлинения.

Случай „б“ — влияние внешних напряжений, приложенных перпендикулярно легкой оси.

Если в случае „а“ внешнее растягивающее напряжение приводило к увеличению H_c только для пленок, у которых величина отношения $H_c/H_k > 0,6$, то в этом случае изменения более значительны.

Ввиду того, что в пленках существует некоторый скос ОЛН относительно грани подложки, а также из-за угловой дисперсии анизотропии, точно приложить ось деформации вдоль легкой или трудной оси практически невозможно, поэтому под действием внешних напряжений происходит поворот ОЛН. Коэрцитивная сила определялась каждый раз в направлении новой легкой оси. На рис. 4 приведены графики зависимости H_c от величины относительного удлинения ε двух пленок № 1 и № 6, когда растягивающие напряжения действуют близко к трудной оси. На том же рисунке показано изменение поля анизотропии (штрихпунктирная линия), которое определялось методом „спрямления“ [12], так как применить метод экстраполяции [13] невозможно. Уменьшение H_k ведет к увеличению отношения H_c/H_k . На рис. 3 представлены изменения H_c/H_k от величины относительного удлинения этих же пленок.

Как видно из рис. 4, и в этом случае изменение $(H_c)_0$ происходит тогда, когда поле анизотропии близко по своей величине к коэрцитивной силе.

Если еще при небольших напряжениях (пленка № 6) процесс перемангничивания идет смещением границ, то, как только H_k приближается к H_c , в перемангничивании принимают участие также процессы вращения намагниченности и коэрцитивная сила падает.

При $H_k = 0$ пленка имеет минимальную H_c и, очевидно, максимальную угловую дисперсию.

При дальнейшем росте ε_1 коэрцитивная сила опять растет (произошел переход случай „б“ → случай „а“), однако, как и в случае „а“, наступает эффект насыщения. Характерно, что момент насыщения наступает при $H_c/H_k \approx 0,6$.

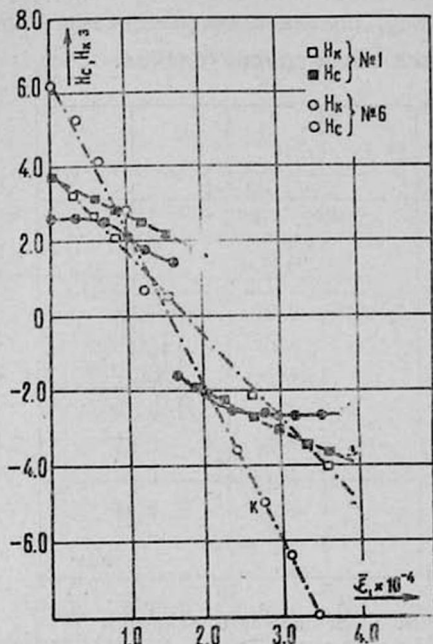


Рис. 4. Зависимость коэрцитивной силы и поля анизотропии от величины относительного удлинения (случай „б“).

Таким образом, и в этом случае внешнее напряжение изменяет (уменьшает) H_k , которое в свою очередь влияет на характер перемагничивания, а последний на величину (H_c).

В ы в о д ы

Рассмотрено влияние внешнего напряжения на величину коэрцитивной силы и показано, что:

1. Для пленок с $H_c/H_k \lesssim 0,6$ и $\lambda_s > 0$ внешнее растягивающее напряжение, приложенное в направлении легкого намагничивания, не влияет на величину коэрцитивной силы, если же $H_c/H_k > 0,6$, то коэрцитивная сила зависит от внешнего напряжения.

2. Величина W зависит от отношения H_c/H_k .

3. Предложен механизм перемагничивания пленки вдоль ОЛН под действием внешнего напряжения, приложенного параллельно или перпендикулярно легкой оси.

ЕрНИИММ

Поступила 10 августа 1966

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. T. S. Crouter, J. Appl. Phys., 34, 50 (1963).
2. E. N. Mitchell et. al., J. Appl. Phys., 34, 715 (1963).
3. В. А. Буравихин, В. Г. Казаков, ФММ, 19, 45 (1965).
4. H. L. Pinch, A. A. Pinto, J. Appl. Phys., 34, 828 (1964).
5. В. А. Буравихин, В. Г. Казаков, В. И. Попов, Изв. АН СССР, сер. физ., 29, 659 (1965).
6. Л. И. Лесник, Г. И. Левин, С. Н. Каверина, Изв. АН СССР, сер. физ., 29, 591 (1965).
7. А. А. Трчунян, К. А. Наринян, В. А. Джидарян, Сб., Магнитные аналоговые элементы, Из-во Наука, Москва (1965).
8. С. П. Тимошенко, Сопротивление материалов, 2, 69 (1965).
9. В. В. Кобелев, А. А. Корсунский, Изв. АН СССР, сер. физ. 25, 592 (1961).
10. E. Z. Feldtkeller, Elektr. Rechenanl, 3, 3063 (1960).
11. E. Z. Feldtkeller, Naturwissensch, 48, 474 (1961).
12. В. В. Кобелев, Сб., Магнитные элементы устройств вычислительной техники, Из-во АН СССР, М. (1961).
13. M. P. Prutton, E. M. Bradley, Proc. Phys. Soc., 75, 484 (1960).

ԱՐՏԱՔԻՆ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՖԵՐՈՄԱԳՆԵԻՍԱԿԱՆ ԲԱՐԱԿ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ԿՈՆԵՑԻՏԻՎ ՈՒԺԻ ՎՐԱ

Վ. Ա. ԶԻՒԱՐՅԱՆ, Հ. Ա. ԹՈՂՈՒՆՅԱՆ

Հոդվածում դիտվում է արտաքին լարումների ազդեցությունը բարակ ֆերոմագնիսական թաղանթների կոնցիտիվ ուժի վրա, երբ արտաքին լարումն ազդում է թեթև և ծանր առանցքների ուղղությամբ:

Դիտված է այդ լարումների ազդեցության տակ թեթև առանցքի պտտման դեպքը:

Ստացված արդյունքների հիման վրա ցույց է տրված:

1. Արտաքին ձգող լարումները թեթև առանցքի ուղղությամբ չեն ազդում կոնցիտիվ ուժի վրա, երբ $H_c/H_k < 0,6$ և $\lambda_s > 0$, իսկ եթե $H_c/H_k > 0,6$, այդ դեպքում կոնցիտիվ ուժի մեծությունը կախված է արտաքին լարումներից:

2. H_c/H_k հարաբերությունը որոշում է պտտվող հոսքի W քանակը, երբ վերամագնիսացումը տեղի է ունենում թեթև առանցքի ուղղությամբ:

3. Երբ լարումները ուղղահայաց են թեթև առանցքին, տեղի է ունենում վերջինիս պտույտը:

4. Բացատրվում է արտաքին լարումների ազդեցության տակ վերամագնիսացման մեխանիզմը, երբ լարումները ներդրված են թեթև առանցքին զուգահեռ և ուղղահայաց:

EFFECTS OF THE EXTERNAL STRESSES ON THE VALUE OF COERCIVE FORCE IN THIN FERROMAGNETIC FILMS

V. A. DJIDARIAN and A. A. TRCHUNIAN

The effects of the stresses applied along easy and hard magnetization directions of thin ferromagnetic films on the value of coercive force are discussed and explanations are suggested. The rotation of the easy axis under the action of the applied stresses is shown.