Доклады Академии наук СССР
1955. Том 104, № 4

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Е. И. ГУРВИЧ и Е. КОНДОРСКИЙ

О СВЯЗИ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНО-МЯГКИХ СПЛАВОВ С ТОЛЩИНОЙ ЛИСТА

(Представлено академиком Г. В. Кордюмовым 20 IV 1955)

Уменьшение толщины листа магнитно-мягких сплавов сопровождается обычно ухудшением их магнитных свойств: магнитная проницаемость уменьшается, коэрцитивная сила и потери на гистерезис увеличиваются. Постепенное ухудшение магнитных характеристик начинается обычно с толщины 0,5—0,2 мм, в зависимости от состава. Эта особенность магнитно-мягких сплавов известна сравнительно давно ([1]). Причины ее до настоящего времени не установлены, хотя и высказаны предположения о возможном влиянии поверхностного слоя, обладающего более низкими свойствами, на характеристики листа в целом ([1–3]), а также о влиянии магнитной структуры ферромагнетиков в листах малой толщины ([4, 5]). Остается невыясненным, какая из этих причин доминирует, т. е. вызвано ли падение свойств магнитно-мягких сплавов с уменьшением толщины листа несовершенством технологии их изготовления или специфическим влиянием размеров областей самопроизвольной намагниченности.

Мы изучали связь магнитных характеристик с толщиной листа при изменении ее от 0,2 до 0,025 мм. Исследования проводились на сплавах молибденовый пермаллой и 50% пермаллой. Образцы имели форму ко-

Таблица 1

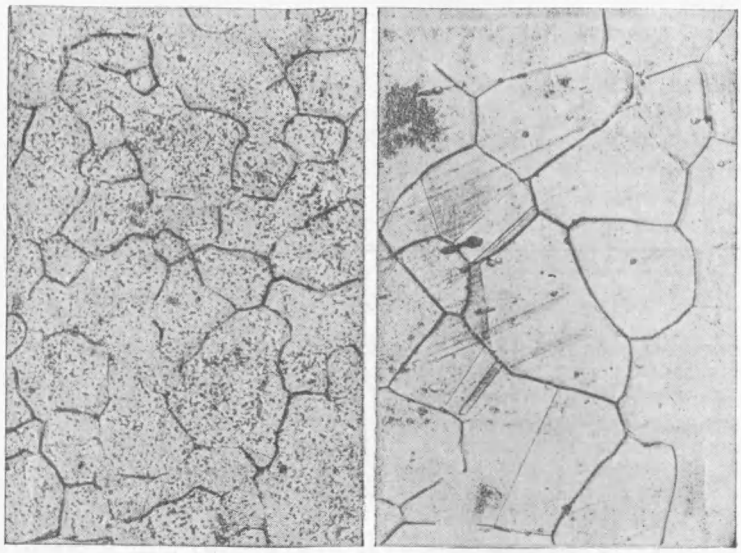
Зависимость магнитных свойств от толщины листа

Сплав	Образцы изготовлены 1-м методом			Образцы изготовлены 2-м методом				Образцы изготовлены 3-м методом			
				Толщина (мм)				Толщина (мм)			
	толщина, мм	макс. проницаем. $\mu_m \cdot 10^{-3}$ (г/э)	коэрцитивная сила H_c (э)	исходная	конечная	макс. проницаем. $\mu_m \cdot 10^{-3}$ (г/э)	коэрцитивная сила H_c (э)	исходная	конечная	макс. проницаем. $\mu_m \cdot 10^{-3}$ (г/э)	коэрцитивная сила H_c (э)
Молибденовый пермаллой	0,20	240	0,010	0,20	0,15	185	0,012	0,20	0,15	280	0,009
	0,15	190	0,012	0,20	0,09	140	0,019	0,20	0,09	270	0,009
	0,09	140	0,019	0,15	0,09	140	0,019	0,15	0,09	250	0,011
	0,05	100	0,025	0,15	0,06	100	0,025	0,15	0,065	220	0,012
	0,025	—	0,045	0,09	0,04	90	0,032	0,09	0,04	155	0,017
				0,05	0,025	—	0,041	0,05	0,025	—	0,020
50% пермаллой	0,20	38	0,12	0,20	0,15	40	0,125	0,20	0,15	43	0,12
	0,16	38	0,13	0,20	0,10	36	0,130	0,20	0,07	—	0,11
	0,10	33	0,14	0,15	0,10	36	0,135	0,16	0,11	44	0,125
	0,05	—	0,19	0,15	0,06	—	0,15	0,16	0,06	—	0,125
	0,03	—	0,25	0,10	0,05	—	0,18	0,10	0,05	—	0,135
				0,05	0,03	—	0,27	0,05	0,03	—	0,17

лец размером 20 × 30 мм и были изготовлены тремя различными методами:

1) Обычная технология изготовления образцов сплавов: холодная прокатка полос до требуемой толщины, штамповка колец, отжиг. При прокатке полосы подвергались промежуточным отжигам с тем, чтобы обжатие составляло 60—70%. Изоляционной прослойкой между кольцами при отжиге служил тальк, обычно используемый для этой цели.

2) Уменьшение толщины штампованных колец посредством удаления поверхностных слоев электролитической полировкой с последующим отжигом.



а *б*

Рис. 1. Микроструктура 50% пермаллоя: *а* — на поверхности образца толщиною 0,15 мм, изготовленного обычным технологическим методом; *б* — на поверхности образца толщиною 0,075 мм, полученного из предыдущего путем его электролитической полировки после термической обработки. Перед травлением образцы не подвергались механической шлифовке

3) Уменьшение толщины термически обработанных колец посредством удаления поверхностных слоев электролитической полировкой без каких-либо дополнительных воздействий на кольцо.

Во всех трех случаях отжиг производился в вакууме (10^{-2} мм рт. ст.) при 1100°. Измерения магнитных свойств производились обычным баллистическим методом. Данные измерений приведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 видно, что уменьшение толщины образцов, производимое разными методами, приводит к различным результатам. В первых двух случаях имеет место обычная тенденция ухудшения свойств сплавов с уменьшением толщины. Удаление поверхностного слоя при помощи электролитической полировки поверхности, произведенное до термической обработки, не оказывает никакого влияния на изменение свойств молибденового пермаллоя и лишь незначительно улучшает свойства образцов 50% пермаллоя. Однако при третьем методе при уменьшении толщины магнитные характеристики не только не ухудшаются, но даже несколько улучшаются, причем их абсолютный уровень определяется той толщиной, в которой производилась конечная термическая обработка.

Из табл. 1 следует, что при обычном технологическом процессе изготовления сплавов магнитные свойства распределены по сечению листа

неравномерно, причем в средних слоях листа они выше, чем на поверхности. Это заключение подтверждается сравнением микроструктуры в наружных и внутренних слоях листа (рис. 1): внутри листа зерно более крупное и однородное.

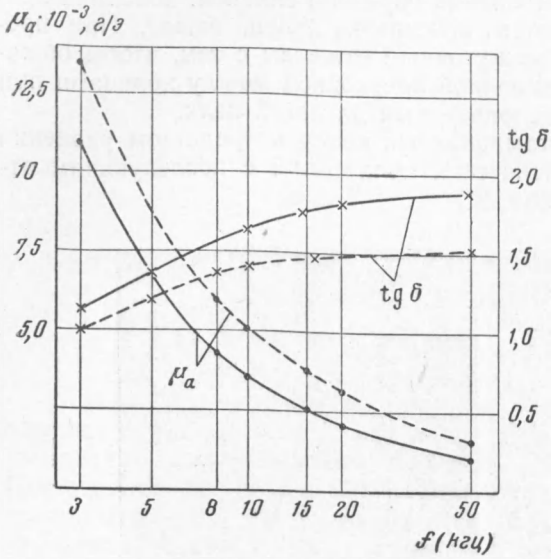


Рис. 2. Частотные характеристики начальной магнитной проницаемости μ_α и тангенса угла потерь δ молибденового пермаллоя при толщине листа 0,09 мм. Сплошные линии относятся к образцу, изготовленному обычным технологическим методом, пунктирные — к образцу, полученному электролитической полировкой поверхности кольца толщиною 0,20 мм после его термической обработки

Измерения микротвердости, произведенные на тех же образцах, показали также, что в поверхностных слоях листа микротвердость значительно выше, чем во внутренних.

Неоднородность распределения свойств по сечению листа наиболее резко проявляется в динамических характеристиках ферромагнетиков. Из двух образцов одинаковой толщины, изготовленных различными способами, меньшей динамической проницаемостью и бóльшими потерями обладает образец, полученный по обычной технологии (рис. 2). Относительное ухудшение его свойств (по сравнению с полированным образцом) возрастает с повышением частоты. Это можно объяснить только тем, что по мере увеличения частоты вследствие поверхностного эффекта намагничивание происходит в основном в поверхностных слоях, где магнитные свойства этого образца значительно ниже, чем полированного.

На основании изложенного можно заключить, что в исследованных магнитно-мягких сплавах явления ухудшения магнитных свойств с уменьшением толщины листа до 0,05—0,025 мм и неоднородного их распределения по сечению не связаны с влиянием доменной структуры, равно как и не вызваны бóльшим наклепом поверхностного слоя при прокатке.

Весьма вероятно, что основная причина этих явлений заключается во влиянии примесей, содержащихся в среде отжига и оседающих в листе в процессе термической обработки с неравномерной концентрацией по сечению. С уменьшением толщины проникновение примесей вглубь листа происходит более интенсивно и действие их становится более ощутимым.

Центральный научно-исследовательский
институт черной металлургии

По ступил
19 IV 1955

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] В. С. Меськин, Ферромагнитные сплавы, М., 1937. [2] W. E. Randall, H. H. Scholefield, Proc. J. E. E., 97, 56, II, 131 (1950). [3] J. Epelboin, J. Phys. Rad., 12, 3, 361 (1951). [4] В. А. Зайкова, Я. С. Шур, ДАН, 91, № 4, 663 (1954). [5] M. F. Littman, El. Eng., 71, 9, 792 (1952).