

**ОБ ИДЕАЛЬНЫХ КРИВЫХ НАМАГНИЧИВАНИЯ
ФЕРРОМАГНЕТИКОВ**

Л. В. Киренский, А. И. Дрокин, В. С. Черкашин, Р. П. Смолин

1. ВВЕДЕНИЕ

Еще Виллари [1] было известно, что намагниченность образца изменяется под действием механических напряжений и электрического тока.

Юинг [2] утверждал, что если при снятии кривой намагничивания после каждого изменения поля образец подвергать ударам, то получится безгистерезисная кривая.

Героза и Финди [3] получали безгистерезисную кривую наложением на образец постоянного и переменного магнитного поля при снятии кривой намагничивания. Намагниченность измерялась в проволоке, по которой протекал переменный ток, создающий поле, перпендикулярное постоянному намагничивающему полю.

Термин „идеальная“—безгистерезисная кривая намагничивания ферромагнетиков был введен Штейнгаузом и Гумлихом [4]. Они получали идеальную кривую, накладывая на образец после каждого изменения постоянного поля продольное переменное поле, параллельное постоянному. При этом амплитуда переменного поля плавно возрастала от нуля до некоторой наибольшей величины, а затем плавно убывала до нуля.

Еще в 30-х годах Аркадьев [5] указывал, что термин „идеальная кривая намагничивания“ не совсем удачен, тем не менее он вошел в обиход.

Позднее в литературе [6—12] было указано множество способов получения идеальных кривых. Чаще всего их получают наложением на образец постоянного и переменного поля с убывающей до нуля амплитудой. Указывалось также, что ее можно получить „температурной тряской“, т. е. последовательным нагревом и охлаждением, „механической тряской“—знакопеременными механическими напряжениями и даже простым постукиванием по образцу в магнитном поле. Считалось, что такие воздействия на образец достаточны для установления состояния параллельной намагниченности в соседних ферромагнитных областях [12].

Теория магнитного гистерезиса и идеальных кривых намагничивания в слабых магнитных полях для кристаллических ферромагнетиков была разработана Кондорским [13,14]. Эта теория получила качественное подтверждение в работах Попцова и Черниковой [15,16]. Идеальные кривые в этих работах получались методом наложения на образец постоянного и переменного поля с убывающей до нуля амплитудой.

литудой. Экспериментальные идеальные кривые не точно совпадали с теоретическими, рассчитанными для трехосного материала, а были ближе к теоретическим кривым для одноосного материала, хотя материал был трехосным. Это объяснялось различием в ориентациях осей легчайшего намагничивания в зернах и неизбежной магнитной и кристаллографической текстурой и. т. п. в реальном материале.

Вопрос о том, совпадают ли между собою идеальные кривые, полученные разными способами, до сих пор не решен, и решению этого вопроса посвящено настоящее исследование.

В работе идеальные кривые получались наложением на образец постоянного и переменного поля с убывающей до нуля амплитудой, с помощью механической тряски ультразвуком и постукиванием, температурной тряской с нагревом образца до температур, лежащих как ниже, так и выше точки Кюри, с последующим охлаждением до исходной температуры. При нагреве образцов до температур, лежащих ниже точки Кюри, и охлаждении до исходной температуры процесс нагрева и охлаждения повторялся 4 раза.

2. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Объектами для исследований служили образцы никеля и сплавов никель-хром и никель-медь. Такие образцы были выбраны потому, что они имеют достаточно широкую петлю гистерезиса и сравнительно низкую температуру Кюри. Химический состав образцов, их геометрические размеры и некоторые магнитные характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ образца	Химический состав	Геометрические размеры (мм)			H_c G/Oe	θ (°C)
		длина	ширина	толщина		
1	99,91 % Ni	100	2,5	0,5	13,4	360
2	96,92 % Ni, 3 % Cr	100	диаметр	1,0 мм	21,5	320
3	90 % Ni, 10 % Cu	100	3,0	0,2	5,4	170
4	99,22 % Ni	140	2,0	0,5	13,5	360

Образец № 4 был сильно наклепан.

Специальной термообработки образцы не проходили, так как в случае высокотемпературного отжига петля гистерезиса стала бы узкой, и различия в ходе кривых были бы очень малыми.

Измерения проводились на вертикальном аstaticеском магнитометре, подробно описанном в литературе [17].

Кондорский [18] указывалось, что способ размагничивания образца может влиять на ход кривых намагничивания. Это подтверждается на опыте. С образцов были сняты девственные кривые намагничивания, снятые с образцов 1, 2 и 3 (рис. 1), после размагничивания их переменным током, с убывающей до нуля амплитудой (пунктирные линии) и нагревом до температуры Кюри, с последующим охлаждением до исходного состояния (20°C) в отсутствие магнитного поля (сплошные кривые).

Способ размагничивания влияет на температурную зависимость намагниченности образца [17], на величину магнитострикции [19] и других эффектов [20]. Поэтому перед каждым измерением образцы размагничивались нагревом до температуры Кюри с последующим охлаждением в отсутствие магнитного поля.

Озвучивание образцов проводилось на частоте 20,5 кГц. Амплитуда переменного звукового давления составляла 0,3 кг/мм². При больших интенсивностях озвучивания образцы разрушались. Методика озвучивания образцов подробно описана в литературе [21].

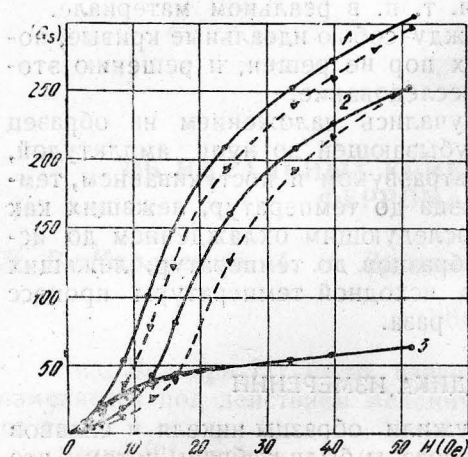


Рис. 1.

С каждого образца снимались девственные кривые намагничения: кривые намагничения озвучиваемого образца при увеличении и уменьшении магнитного поля; кривые при температурной тряске при четырехкратном нагреве до температур, лежащих ниже точки Кюри, и охлаждении до исходной температуры; кривые при наложении на образец постоянного и переменного поля с убывающей до нуля амплитудой, а также постоянного и коммутируемого поля с убывающей до нуля амплитудой и кривые, точки которых получены после нагрева образца до температуры, лежащей выше

точки Кюри, с последующим охлаждением до исходной температуры, т. е. кривые, полученные после прохождения полного цикла А (нагрев—охлаждение)—температурного магнитного гистерезиса (т. м. г.).

Ошибка при измерениях составляла не более 5%. Повторяемость результатов измерений была хорошей.

Кроме этого, проводились наблюдения изменения намагниченности при постукивании образцов в магнитном поле и при механической тряске на низких частотах (50 гц). Эти кривые не наносились на графики из-за большого разброса точек, однако было обнаружено, что такой способ не приводит к безгистерезисным кривым намагничения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 2 приведены графики зависимости намагниченности от поля для никелевого образца № 1. Девственная кривая 1 идет ниже всех остальных кривых и лишь в высоких полях она пересекает кривую 2, полученную в результате озвучивания образца, и сливается с остальными кривыми при насыщении.

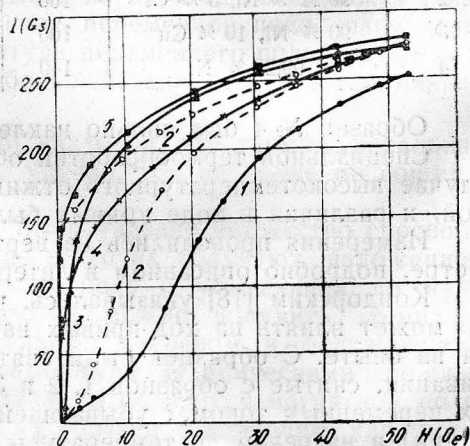


Рис. 2.

Кривая 2 получена с озвучиваемого образца, при нарастании магнитного поля, кривая 2' получена с озвучиваемого образца при уменьшении магнитного поля. Безгистерезисную кривую при озвучивании

образца получить не удалось, так как при увеличении интенсивности ультразвука образец разрушается.

Кривая 3 получена температурной тряской (нагрев от 20 до 250°C и охлаждение до 20°C). Кривая 4 получена при наложении на образец переменного поля с убывающей до нуля амплитудой. Эта безгистерезисная кривая вначале идет ниже кривой 3, затем пересекает ее и сливается со всеми кривыми в полях насыщения. Безгистерезисная кривая 5 получена из конечных значений намагниченности после прохождения полного цикла т. м. г. Эта кривая идет выше остальных экспериментальных кривых.

Для образца №1 были измерены намагниченность насыщения и обратимая восприимчивость и рассчитаны точки идеальной кривой в слабых полях для трехосных ферромагнетиков (при параметре $a=3$) по теории Кондорского [14]. Эти точки ложатся выше кривой 5 (на рис. 2 не нанесены).

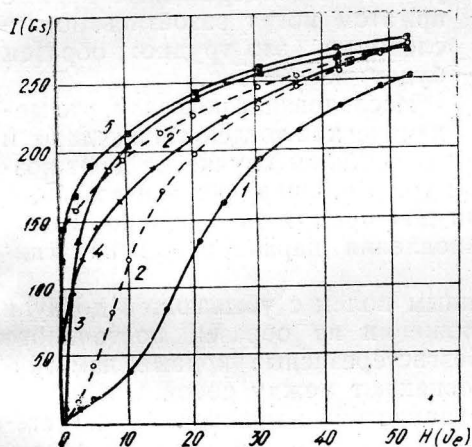


Рис. 3.

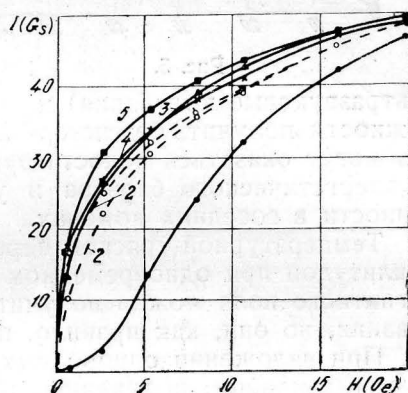


Рис. 4.

На рис. 3 представлены соответствующие экспериментальные кривые для образца № 2 (при температурной тряске—кривая 3—образец нагревался до 250°C). На рис. 4 изображены соответствующие кривые для образца № 3 (при температурной тряске—кривая 3—образец нагревался до 150°C).

Как видно из рис. 3 и 4, ход различным образом полученных кривых аналогичен соответствующим кривым рис. 2.

Исходя из современной теории технической кривой намагничивания, можно думать, что безгистерезисные кривые, полученные разными способами, будут приближаться друг к другу и совпадут в том случае, если на образец во время измерений накладывать однородные механические напряжения в пределах упругой деформации, так как потенциальные барьеры при этом будут сглаживаться. Это было проверено на образце № 4. Безгистерезисные кривые при этом получались двумя способами—прохождением полного цикла т. м. г. (кривые 1 рис. 5) и наложением на постоянное поле переменного с убывающей до нуля амплитудой (кривые 2 рис. 5). Экспериментальные данные приведены на графиках рис. 5. Из этих графиков видно, что по мере возрастания нагрузки ($a=0$; $b=2,37$; $v=6,23$; $z=12,12$; $d=20$; $e=30$ кг/мм²) безгистерезисные кривые действительно приближаются друг к другу и в пределе совпадают. Но при таких нагрузках и пет-

ля гистерезиса вырождается в прямую. При дальнейшем увеличении нагрузки ожидаемого расхождения безгистерезисных кривых получить не удалось, потому что образец начинает течь при прохождении цикла т. м. г. и разрушается.

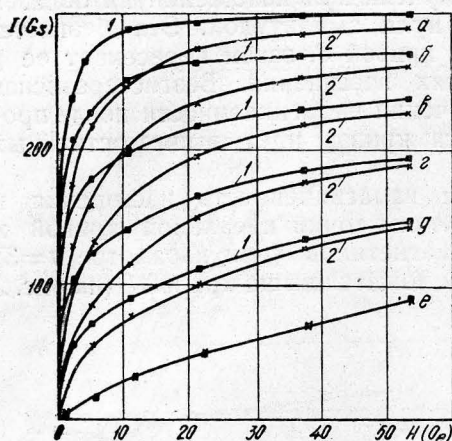


Рис. 5.

Сжатую образец не подвергался, так как из исследований Лаптея [22] и так ясно, что при упругих деформациях петля гистерезиса сужается, а значит и безгистерезисные кривые будут приближаться друг к другу, ибо они лежат в пределах петли.

В области пластических деформаций при сжатии образца петля претерпевает сильное расширение. Безгистерезисные кривые при этом могут разойтись, но исследовать это трудно: образец будет изгибаться.

Исследования показали, что механические воздействия (удары и ультразвуковые колебания) на образцы в общем случае не дают возможности получить безгистерезисные кривые. Очевидно, эти воздействия могут оказаться недостаточными для преодоления потенциально энергетического барьера и установления параллельной намагниченности в соседних доменах.

Температурной тряской переменным полем с убывающей до нуля амплитудой при одновременном наложении на образец постоянного магнитного поля можно получить безгистерезисные кривые намагничивания, но они, как правило, не совпадают между собой.

При наложении однородных механических напряжений безгистерезисные кривые, полученные разными способами, в пределе совпадают между собой.

4. ВЫВОДЫ

1. Говоря о безгистерезисных кривых в реальных ферромагнетиках, нужно иметь в виду, что таких кривых может быть несколько, в зависимости от способа их получения.

2. Наибольшее приближение к теоретической идеальной кривой имеют кривые, полученные в результате прохождения образцом полного цикла A температурного магнитного гистерезиса.

3. Периодические механические знакопеременные напряжения с частотой 50 и 20000 гц и постукивания по образцу в магнитном поле не приводят, как правило, к безгистерезисным кривым.

4. При наложении значительных однородных механических напряжений на образец, не выходящих за пределы упругой деформации, безгистерезисные кривые, полученные разными способами, приближаются друг к другу и в пределе совпадают.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] E. Villari. Ann. Phys. Chem., **126**, 87, 1865. [2] J. Ewing. Trans. Roy. Soc., **1**, 564, 1885. [3] G. Gerosa et Finzi. Rend. del Inst. Lomb., **24**, 1891. [4] W. Steinhaus und F. Gumlich. Verh. d. Deutsch. Phys. Ges., **15**, 369, 1915. [5] В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах, ч. 1, Объединенное научно-техническое

изд-во. М—Л., 1934. [6] S. Proscopiu. Journ. Phys. rad., 1, 365, 1930. [7] H. Lange. Zr. f. techn. Phys., 7, 117, 1930. [8] Е. Г. Шрамков. Сб. тр. ВНИИМ, вып. 4, 16, 1930; вып. 1 (17), 1932; вып. 18 (34), 1938; вып. 10 (70), 1952. [9] J. R. Ashworth. Ferromagnetism, London, 1938. [10] С. В. Вонсовский и Я. С. Шур. Ферромагнетизм, ОГИЗ, Гостехиздат, М.—Л., 1948. [11] Р. Бозорт. Ферромагнетизм. ИЛ, М., 1956. [12] К. М. Поливанов. Ферромагнетики, Госэнергоиздат, М.—Л., 1957. [13] Е. И. Кондорский. ДАН СССР, 30, 7, 198, 1941. [14] Е. И. Кондорский. Journ. of Phys., 6, 93, 1942. [15] Н. Попцов и Л. А. Черникова. Journ. d. Phys., 10, 1946. [16] Л. А. Черникова. ЖЭТФ, 21, 4, 514, 1951. [17] А. И. Дрокин и В. Л. Ильющенко. ЖЭТФ, 29, 3 (9), 339, 1955. [18] Е. И. Кондорский. ЖЭТФ, 10, 420, 1940. [19] А. Я. Власов. Изв. АН СССР, сер. физ. 16, 6, 680, 1952. [20] Н. В. Решетникова. Диссертация, МОПИ, 1955. [21] Л. В. Киренский, А. И. Дрокин, В. С. Черкашин. Сб. „Применение ультразвуки к исследованию вещества“, вып. 9, 131, МОПИ, М., 1959. [22] Д. А. Лаптей. Диссертация. Красноярский пединститут, 1959.

Институт физики СО АН СССР
Красноярский пединститут

Поступила в редакцию
1 августа 1960 г.