

УДЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ В ФЕРРОМАГНЕТИКЕ

Тимофеев И.А.

Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт релестроения, Чебоксары

Подробная информация об авторах размещена на сайте

«Учёные России» - <http://www.famous-scientists.ru>

На железокремнистых сплавах исследовано удельное сопротивление в зависимости от плотности дислокаций и концентрации доменов. Изучено применение удельных потерь при индукции намагничивания в 1,0 и 1,5 Тл для железокремнистых сплавов Fe-4% Si и Fe-6,5% Si.

Приведены необходимые практические сведения, сравнительные данные и результаты испытаний, которые можно использовать для выбора необходимой технологии изготовления. Разработанная инновационная технология магнитопроводов может быть применена в техническом решении при изготовлении магнитных систем различных электротехнических изделий.

В электротехнических агрегатах, таких как генераторы, двигатели, система генератор-двигатель, трансформаторы, магнитные усилители, электромагниты контакторов и магнитных пускателей главной задачей является распределение, усиление и преобразование электромагнитной энергии. Для этого требуется применение в магнитных системах для них материалов с малыми потерями и высокой индукцией насыщения. Этим требованиям

наилучшим образом удовлетворяют железокремнистые сплавы.

Легированием кремнием, который образует с железом твердый раствор замещения, обуславливает увеличение удельного электрического сопротивления. Влияние кремния на удельное электрическое сопротивление определяется следующей приближенной эмпирической формулой [1]:

$$\rho = 1,0 \cdot 10^{-7} + 1,2\% \text{Si} \cdot 10^{-7} \quad (1)$$

Железокремнистые сплавы с низкими значениями удельного электрического сопротивления не находят широкого применения даже в технике низких частот из-за повышенных величин вихревых токов. На величину и направление вихревых токов, кроме размеров магнитного сердечника, влияют его удельное электрическое сопротивление, частота электрического тока и магнитная проницаемость. Соответственно вихревые токи, вызываемые перемагничиванием магнитных материалов,

влияют на удельные электрические потери.

Уточнение расчетной формулы

Современные формулы для подсчета удельных потерь дают определенные погрешности. Рассмотрим это на примерах.

Попытка произвести расчет удельных потерь на вихревые токи в ферромагнетике была предпринята в 1926 г. Б.А. Введенским [2]. Он предложил следующую формулу:

$$P_B = \frac{\pi d^2 \cdot B_o^2 \cdot \omega}{3q} \quad (2)$$

где d – толщина пластинки;

B_o – магнитная индукция, $B_o = \mu \cdot H_o$;

ω – циклическая частота;

q – магнитная проводимость.

Однако формула (2) весьма приближенно определяет удельные потери на вихревые токи. Ошибки Введенского состояли в том, что значение магнитной проводимости q необходимо было ввести в

числитель, а не в знаменатель. Кроме того, в числитель необходимо было ввести значение циклической частоты не в первой степени, а во второй, т.е. ω^2 , а в знаменателе необходимо было учесть значение плотности материала.

Интерес к определению удельных потерь в магнитных материалах появился в связи с возможностью широкого их применения при создании горячекатаной электротехнической стали для электрических машин. После того, как в 1935 г. Госс [3]

$$P_{\text{полн.}} = \frac{B_0^3 \cdot \epsilon}{4\mu^3} + \frac{\pi d^2 B_0 \cdot \omega}{3q} + cB_0^2, \quad (3)$$

где B – постоянная для данного сплава величина;

μ – магнитная проницаемость;

c – не зависящая от B_0 и ω величина.

Экспериментальная проверка показала, что ошибки Елвуда и Легга состояли в том, что кроме тех ошибок, которые были сделаны Введенским в приближенное полуфеноменологическое уравнение (3) необходимо было ввести значения плотности материала и коэрцитивной силы. Вве-

$$\frac{dW}{dt} \sim \lambda_{100}^2 \cdot \frac{l^4}{\delta \cdot \epsilon^2} N \cdot S \cdot n, \quad (4)$$

где λ_{100}^2 – магнитоэлектрическая константа;

l – средняя толщина дислокационного сегмента;

δ – толщина доменной структуры;

v – вектор Бюргерса;

N – плотность дислокаций;

S – площадь смещающихся границ доменов;

n – число доменов в единичном объеме ферромагнетика.

В этой зависимости учтено поглощение энергии изгибающимися под действием упругого поля доменными границами с дислокационными сегментами, но не учтена гистерезисная составляющая потерь и

$$P_{\text{в}} = \frac{4B_m^2 \cdot f^2 \cdot d^2 \cdot k_f^2 \cdot 10^{-10}}{3\gamma \cdot \rho}, \quad (5)$$

где B_m – амплитуда магнитной индукции, Тл;

f – частота переменного тока, Гц;

d – толщина пластин, мм;

обнаружил высокие магнитные свойства у холоднокатаной электротехнической стали вдоль направления прокатки, интерес к изучению удельных потерь повысился. В последующие годы активизируются исследования по улучшению электрических характеристик стали.

Первое приближенное полуфеноменологическое уравнение для расчета полных потерь в проводящем ферромагнетике в 1937 г. дали Елвуд и Легг [4]:

денные параметры B_0^3 и μ^3 в уравнение (3) дополнительно искажают результаты расчета.

Приведенная формула (3) не учитывает дислокационную теорию магнитных свойств материалов. Более точную зависимость определения потерь энергии от физических величин при перемагничивании ферромагнетика дал Мишин [5]:

не принято во внимание удельное электрическое сопротивление материала. Однако эта зависимость позволяет определять потери энергии от физических величин и не позволяет практически определять удельные потери на промышленных магнитных материалах в зависимости от технических величин.

Практическую формулу для инженерных расчетов удельных электрических потерь на вихревые токи предложил Круг [6]. Он, суммируя множество замкнутых электрических контуров, учел потери по всем контурам и привел следующее выражение:

k_f – коэффициент формы кривой магнитной индукции;

γ – плотность материала пластины, кг/м³;

ρ – удельное электрическое сопротивление материала пластины, Ом·м.

Применяя формулу (5), результаты практических вычислений становятся заниженными в среднем на четыре порядка, т.е. в 10^4 раз.

Однако, чтобы формула (5) была полностью представлена в системе СИ и

$$P_v = \frac{4B_m^2 \cdot f^2 \cdot d^2 \cdot k^2}{3\gamma \cdot \rho} \left[\frac{Bm}{кз} \right]. \quad (6)$$

Из работы Дружинина [1] известно, что потери на гистерезис пропорциональны площади статистического цикла гистерезиса, частоте перемагничивания и об-

соответствовала примерно реальным показателям по потерям на вихревые токи, необходимо подставить в формулу толщину пластин в метрах и упразднить коэффициент 10^{-10} , т.е.:

ратно пропорциональны плотности материала пластины, и определяются из следующего выражения:

$$P_r = \frac{S \cdot f}{\gamma}, \quad (7)$$

где S – площадь статического цикла гистерезиса, Гл· а/м.

Преобразовав петлю гистерезиса в виде прямоугольника, можно площадь ста-

тического цикла гистерезиса приблизительно определить по следующему простой формуле:

$$S = 4B_m \cdot H_c, \quad (8)$$

где H_c – коэрцитивная сила.

Следовательно, удельные потери на гистерезис с учетом формулы (8) можно определить по следующей формуле:

$$P_v = \frac{4B_m \cdot H_c \cdot f}{\gamma} \left[\frac{Bm}{кз} \right]. \quad (9)$$

Определив составляющие потерь по формулам (6) и (9), можно найти общие удельные потери на перемагничивание магнитномягких материалов:

$$P = P_v + P_r = \frac{4B_m \cdot f}{\gamma} \left(\frac{B_m \cdot f \cdot d^2 \cdot k^2}{3\rho} + H_c \right), \quad (10)$$

где H_c – значение коэрцитивной силы приведено без учета плотности дислокаций и концентрации доменов.

На коэрцитивную силу на основе современной дислокационной теории маг-

нитных свойств материалов оказывает влияние взаимодействие доменной и дислокационной структур. Для этого случая коэрцитивная сила может быть представлена в виде: [7]

$$H_c = 1,5 \frac{K \cdot \delta}{\mu_o I_s \cdot D} e^{\frac{A+B}{2}} \cdot \left(\frac{N}{N_o} \right)^{\frac{c_1}{2}} \cdot \left(\frac{n}{n_o} \right)^{-\frac{c_2}{2}}, \quad (11)$$

Здесь K – константа магнитной анизотропии; δ – толщина доменной стенки; μ_o – магнитная постоянная, $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; I_s – самопроизвольная намагниченность; D – диаметр кристаллита; N – текущая плотность дислокаций; N_o – максимальная плотность дислокаций; c_1 – постоянная для отношения плотности дислокаций; n – те-

кущая концентрация доменов; n_o – максимальная концентрация доменов; c_2 – постоянная для отношения концентрации доменов.

Следовательно, окончательно общие удельные потери с учетом формулы (11) можно представить следующее формулой.

$$P = \frac{4B_m \cdot f}{\gamma} \left[\frac{B_m \cdot f \cdot d^2 \cdot k^2}{3\rho} + 1,5 \frac{K \cdot \delta}{\mu_o I_s \cdot D} e^{\frac{A+B}{2}} \cdot \left(\frac{N}{N_o} \right)^{\frac{c_1}{2}} \cdot \left(\frac{n}{n_o} \right)^{-\frac{c_2}{2}} \right]. \quad (12)$$

Удельное электрическое сопротивление магнитного материала является структурно чувствительной величиной запишем уравнение для зависимости удель-

$$\rho = (1,0 + 1,2\%Si) \cdot v \cdot \left(\frac{N}{N_0}\right)^q \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^\varepsilon \cdot 10^{-7}. \quad (13)$$

где v – коэффициент, $v=0,1 \dots 0,9$;

q – постоянная для отношения плотности дислокаций;

ε – постоянная для отношения концентрации доменов.

На удельное электрическое сопротивление магнитного материала влияет взаимодействие доменной и дислокационной структур.

Объекты и методы исследования

Испытания для определения удельного электрического сопротивления были подвергнуты цилиндрические образцы сплавов Fe-4% Si и Fe-6,5% Si длиной $65 \cdot 10^{-3}$ м, диаметром $6 \pm 0,2 \cdot 10^{-3}$ м, технология изготовления которых проводилась по способу [8]. Отбор образцов выполняли по ГОСТ 20559.

Измерение удельного электрического сопротивления проводилось по методу, изложенному в ГОСТ 25947. В качестве прибора использован потенциометр постоянного тока типа Р-4833 с пределом измерения от $1 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^4$ Ом. Класс точности прибора составлял 0,05.

Метод измерения заключается в пропускании через сплав постоянного электрического тока и в определении падения напряжения на известном участке его длины. Удельное электрическое сопротивление вычисляли по формуле:

$$\rho = U \cdot S / (I \cdot L),$$

где U – падение напряжения между контактами, В;

S – площадь поперечного сечения образца, мм²;

I – сила тока, протекающего через образец.

L – расстояние между контактами.

Изучение и изменение структурных дефектов производили посредством облучения образцов гамма-лучами радиоактивных элементов, имеющих длину волны в пределах $1 \cdot 10^{-1} \div 3 \cdot 10^{-3}$ нм. Для этой цели использовали стационарный рентгенов-

ного электрического сопротивления от плотности дислокаций и концентрации доменов в следующем виде с учетом уравнения (1):

ский аппарат типа ТУР-Д-1500 с энергией излучения 150 кЭв.

Металлографические исследования, а также регистрацию дислокационной структуры осуществляли на металлографических микроскопах МИМ-8 и «Неофот-32», а для контроля дислокаций использовали электронный микроскоп BS-613 с ускоряющим напряжением 100 кВ.

Объектами для изучения удельных электрических потерь являлись образцы длиной 0,28 м, шириной 0,03 м, толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. Характеристики снимали при заданной амплитуде индукции 1,0 и 1,5 Тл. Погрешность составляла 3%.

Определение удельных электрических потерь проводилось в соответствии с ГОСТ 12119 на малом аппарата Эпштейна (образцы массой 1 кг) на низкой промышленной частоте 50 Гц. Аппарат применялся в комплекте со следующими измерительными приборами: электронный ваттметр Ф-585, звуковой генератор ГЗ-34, электронный милливольтметр Ф-564 и ламповый милливольтметр ВЗ-38.

Экспериментальные результаты

Для физики магнитных материалов представляет теоретический интерес изучение влияния плотности дислокаций на удельное электрическое сопротивление.

Экспериментальные испытания показали, что удельное электрическое сопротивление образцов с высокой мерой точности структурно чувствительно к возникновению в них дефектов. С увеличением плотности дислокаций адекватно увеличивается удельное электрическое сопротивление. С увеличением плотности дислокаций на один порядок с $6 \cdot 10^{11}$ до $6 \cdot 10^{12}$ м⁻² удельное электрическое сопротивление возрастает для образца из сплава Fe-4%Si с 0,9 до 2,2 Ом·м, т.е. в 2,4 раза, а для образца из сплава Fe-6,5%Si с 1,2 до 2,6 Ом·м, т.е. в 2,3 раза.

Практический интерес представляет определение зависимости удельных потерь от плотности дислокаций и количественного содержания кремния при различных индукциях намагничивания. Влияние дислокационной структуры на удельные потери изучалось в переменных магнитных полях промышленной частоты 50 Гц. На рисунке в логарифмических координатах представлены результаты измерения удельных потерь в зависимости от плотности дислокаций. С увеличением плотности дислокаций на один порядок с $2 \cdot 10^{11}$ до $2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}$ удельные потери увеличиваются в следующих пределах: для образца из сплава Fe-4%Si при магнитной индукции 1,5 Тл с 3,3 до 9,0 Вт/кг, т.е. в 2,7 раза, для образца из сплава Fe-6,5%Si при магнит-

ной индукции 1,5 Тл с 1,8 до 5,8 Вт/кг, т.е. в 3,2 раза; для образца из сплава Fe-4%Si при магнитной индукции 1,0 Тл с 1,2 до 3,6 Вт/кг, т.е. в 3,0 раза, для образца из сплава Fe-6,5%Si при магнитной индукции 1,0 Тл с 0,7 до 2,4 Вт/кг, т.е. в 3,4 раза.

Изучение влияния концентрации доменов на удельное электрическое сопротивление представляет не меньший практический интерес. С увеличением концентрации доменов с $6 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^5 \text{ м}^{-2}$ удельное электрическое сопротивление уменьшается для образца из сплава Fe-4%Si с $2,3 \cdot 10^{-6}$ до $0,37 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, т.е. в 6,1 раза, а для образца из сплава Fe-6,5%Si с $3,45 \cdot 10^{-6}$ до $0,65 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, т.е. в 5,3 раза.

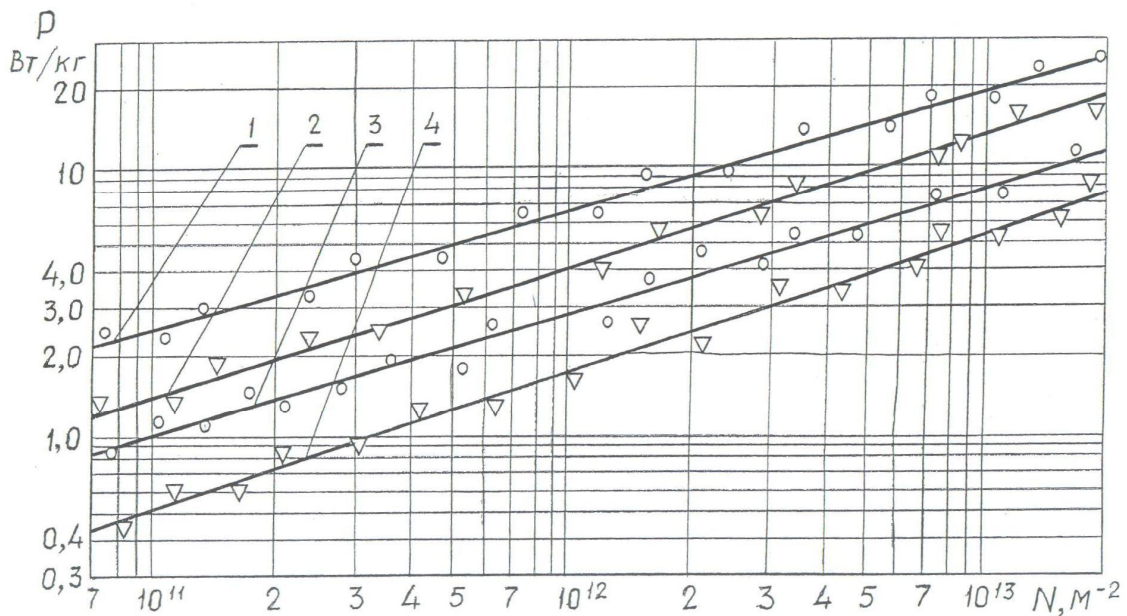


Рис. 1. Зависимость удельных электрических потерь железокремнистых сплавов от плотности дислокаций при различных индукциях намагничивания
1 - Fe-4,0%Si (1,5 Тл); 2 - Fe-6,5%Si (1,5 Тл);
3 - Fe-4,0%Si (1,0 Тл); 4 - Fe-6,5%Si (1,0 Тл);

Обсуждение результатов эксперимента

Об изменении концентрации дефектов в материале можно косвенно судить по изменению удельного электрического сопротивления.

Физическая сущность рассматриваемого явления состоит в следующем. Под действием электромагнитного поля происходят релаксации дислокаций, которые резко отличаются по форме от гармониче-

ских синусоидальных колебаний. Интенсивное движение в металле свободных электронов приводит к рассеиванию энергии от упругих столкновений с дислокациями и к возбуждению последних. Последние тормозят прохождение через металл электрического тока, увеличивая тем самым удельное электрическое сопротивление. Поэтому возникновение в сплаве любых типов дислокаций ведет к возрас-

танию удельного электрического сопротивления, их уменьшение – снижает удельное электрическое сопротивление. Таким образом, при увеличении плотности дислокаций на один порядок удельное электрическое сопротивление увеличивается для образца из сплава Fe-4%Si в 2,4 раза, а для образца Fe-6,5%Si в 2,3 раза.

Повышение удельных потерь происходит за счет повышения плотности дислокаций. Однако при повышении плотности дислокаций, приводящем к ухудшению структуры, затрудняются процессы смещения доменных стенок, которые происходят при меньших индукциях намагничивания. На процессы вращения доменных стенок, происходящие при больших индукциях намагничивания, такое повышение плотности дислокаций отражается с меньшей кратностью. Поэтому при ухудшении структуры сплава за счет повышенной плотности дислокаций увеличение потерь $P_{10/50}$ происходит с большей кратностью, чем для потерь $P_{1,5/50}$.

Рассмотрим влияние концентрации доменов на удельные потери. Приведенные отрывочные данные в [9, 10] являются противоречивыми. По данным [9] в стержне квадратного сечения имелось только два домена. Потери на вихревые токи составляли в несколько раз больше, чем рассчитанные без участия доменной структуры образца. Согласно [10] в толщине листа находилось четыре домена. Потери энергии от вихревых токов составляли в 1,5 раза больше, чем рассчитанные по общеизвестной формуле (5).

Систематические исследования показали, что при увеличении концентрации доменов на один порядок удельное электрическое сопротивление уменьшается для образца из сплава Fe-4%Si в 6,1 раза, а для образца Fe-6,5%Si в 5,3 раза, что в совокупности приводит при индукции намагничивания в 1,0 Тл к увеличению удельных электрических потерь для образца из сплава Fe-4%Si в 3,0 раза, а для образца из сплава Fe-6,5%Si в 3,4 раза, а при индукции намагничивания в 1,5 Тл к увеличению удельных потерь для образца из сплава Fe-4%Si в 2,7 раза, а для образца из сплава Fe-6,5%Si в 3,2 раза.

Выводы

1. Выведена расчетная формула удельных потерь для магнитных материалов в зависимости от плотности дислокаций и концентрации доменов.

2. Установлено что при увеличении плотности дислокаций на один порядок удельное электрическое сопротивление увеличивается для образца из сплава Fe-4%Si в 2,4 раза, для образца Fe-6,5%Si в 2,3 раза, а при увеличении концентрации доменов на один порядок удельное электрическое сопротивление уменьшается для образца из сплава Fe-4%Si в 6,1 раза, для образца Fe-6,5%Si в 5,3 раза, что в совокупности приводит при индукции намагничивания в 1,0 Тл к увеличению удельных потерь для образца из сплава Fe-4%Si в 3,0 раза, для образца из сплава Fe-6,5%Si в 3,4 раза, а при индукции намагничивания в 1,5 Тл к увеличению удельных потерь для образца из сплава Fe-4%Si в 2,7 раза, для образца из сплава Fe-6,5%Si в 3,2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. М.: Энергия, 1974. – 239 с.
2. Введенский Б.А., ЖРФХО, часть физ. 58,241 (1926).
3. Coss N.P. New development in electrical strip steels characterized by fine grain structure approaching the properties of a single crystal. – TASM, 1935, VI, v. 23, № 2, p. 511-544
4. Elwood W.B., Legg V.E., J. Appl. Phys. 8, 351 (1937).
5. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.
6. Круг К.А. Основы электротехники. – М.-Л.: ОНТИ, 1936.
7. Тимофеев И.А. Современные наукоемкие технологии. – 2005. - № 11. - С. 84-86.
8. Мишин Д.Д., Тимофеев И.А. Технология электротехнического производства. – 1978. - № 1(104). – С. 1-3.
9. Williams H., Shockly W., Kittel C. Studies of the propagation velocity of a ferromagnetic domain boundary. – Phys. Rev., 1950, v. 80, № 6.

10. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. 4. III. М.: Энергия, 1969.

11. Тимофеев И.А., Кустов Е.Ф. Известия вузов. Физика. – 2006. - № 3. – С. 26. -32.

SPECIFIC LOSS IN FERROMAGNETIC

Timofeyev I.A.

All-Russia projects design and technological research institute of relay making, Cheboksary

The specific resistance was investigated on the iron-silicon alloys depending on the solidity dislocation and concentration domains. The correlation of specific losses was investigated under induction of magnetizing in 1,0 and 1,5 Tl for iron-silicon alloys Fe-4% Si and Fe-6,5% Si. The necessary practical information, comparative facts and the results of the investigations are given here. This information can be used for choosing of the essential technology of producing. The worked out innovation technology of magnetic conductors can used in technical solving, by producing magnetic systems of different electro technical wares.

