

В. И. ЧЕЧЕРНИКОВ, Ю. Д. ВОЛКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ НИКЕЛЬ-ЦИНКОВЫХ ФЕРРИТОВ В ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ

Исследование ферромагнитных металлов и сплавов вблизи ферромагнитной точки Кюри (θ_f) [1] показало, что переход в парамагнитное состояние, описываемое законом Кюри—Вейсса, осуществляется при температурах, значительно больших температуры Кюри. При этом установлено, что в интервале температур, лежащих близко к ферромагнитной точке Кюри ($T \gtrsim \theta_f$), имеется своеобразная переходная область, связанная с наличием ближнего порядка в ориентации спинов. В этой области магнитная восприимчивость зависит не только от температуры, но и от напряженности магнитного поля.

Поэтому представляло интерес исследовать у ферритов область перехода в парамагнитное состояние, тем более, что смешанные ферриты, как нам известно, в этом направлении еще не изучались и исследование закономерностей в переходной области пока не проводилось. Для этой цели нами была изучена система никель-цинковых ферритов $Ni_{1-z}Zn_zFe_2O_4$, * содержание окиси цинка в которых изменялось в широких пределах ($0 \leq z \leq 1$). Исследование ферритов проводилось при температурах, близких к ферромагнитной точке Кюри на установке, описанной в работе [1].

Основное внимание в работе было уделено изучению медленно охлажденных образцов, которые перед измерением отжигались в течение 10 часов при 1200° , после чего они вместе с печью медленно охлаждались. Для проверки однородности состава ферритов проводились дополнительные исследования. С этой целью из феррита одного состава готовилось несколько образцов, которые изучались в одном и том же интервале температур, и полученные значения восприимчивости сравнивались между собой. Эти значения оказались практически совпадающими.

* Система никель-цинковых ферритов избрана для исследования потому, что ее магнитные свойства резко изменяются с изменением содержания окиси цинка вследствие постепенного перехода феррита из обращенного в нормальный, и при определенном содержании окиси цинка никель-цинковый феррит становится, как известно, неферромагнитным.

На рис. 1 по данным наших измерений представлена зависимость обратной величины молярной парамагнитной восприимчивости ($1/\chi_M$) от температуры (T) для некоторых ферритов никель-цинковой системы. Как видно из рисунка, в непосредственной близости к ферромагнитной точке Кюри ($T \gtrsim \theta_f$) имеется переходная область, которая, как показал опыт, существует у всех исследованных нами ферритов. Ширина этой области увеличивается с ростом содержания окиси цинка в феррите от 30° для феррита состава $\text{Ni}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ до 65° для феррита $\text{Ni}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$. На подобное возрастание ширины переходной

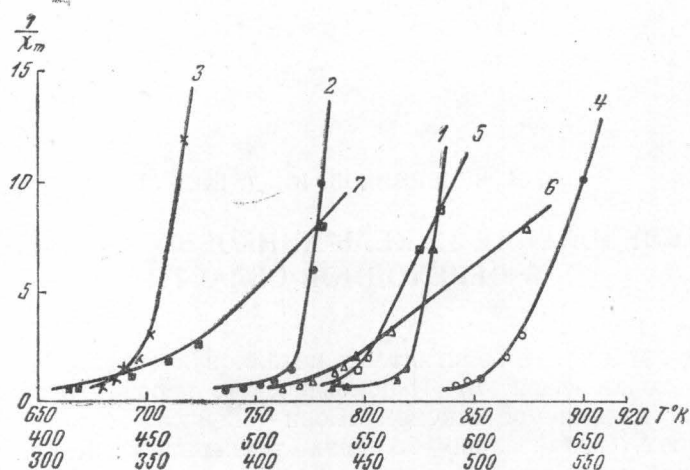


Рис. 1. Зависимость обратной величины восприимчивости для ферритов состава: 1 — $\text{Ni}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Fe}_2\text{O}_4$, 2 — $\text{Ni}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4$, 3 — $\text{Ni}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (при $650\text{--}920^\circ\text{K}$), 4 — $\text{Ni}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{Fe}_2\text{O}_4$, 5 — $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (при $400\text{--}650^\circ\text{K}$), 6 — $\text{Ni}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$, 7 — $\text{Ni}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (при $300\text{--}550^\circ\text{K}$)

области при ферромагнитном превращении было указано также Потэне [2] при определении абсолютной намагниченности насыщения никель-цинковых ферритов.

Наши исследования показали, что в переходной области магнитная восприимчивость медленно изменяется с увеличением температуры, причем после некоторого температурного интервала это изменение становится более заметным. В этой области температур, как будет показано ниже, магнитная восприимчивость является функцией напряженности магнитного поля. При более высоких температурах парамагнитная восприимчивость никель-цинковых ферритов перестает зависеть от напряженности, а зависит только от температуры, подчиняясь закону Нееля [3]. Исследования, проведенные в переходной области, показывают, что зависимость удельной намагниченности σ от напряженности H для всех изученных нами ферритов описывается степенной функцией вида

$$H = \alpha\sigma + \beta\sigma^3, \quad (1)$$

где α и β — коэффициенты, зависящие, как показал эксперимент, от температуры и концентрации.

На рис. 2 приведено семейство изотерм кривых намагничивания для одного из ферритов состава $Ni_{0,7}Zn_{0,3}Fe_2O_4$ в области температур точки Кюри ($\theta_f = 673^\circ K$), где сплошные линии рассчитаны по формуле (1), а экспериментальные данные показаны точками. Формула (1) при определенном выборе констант удовлетворительно описывает экспериментальные результаты. Из рассмотрения кривых намагничивания следует, что с ростом температуры намагниченность при заданном поле заметно уменьшается. При температурах, наиболее близких к

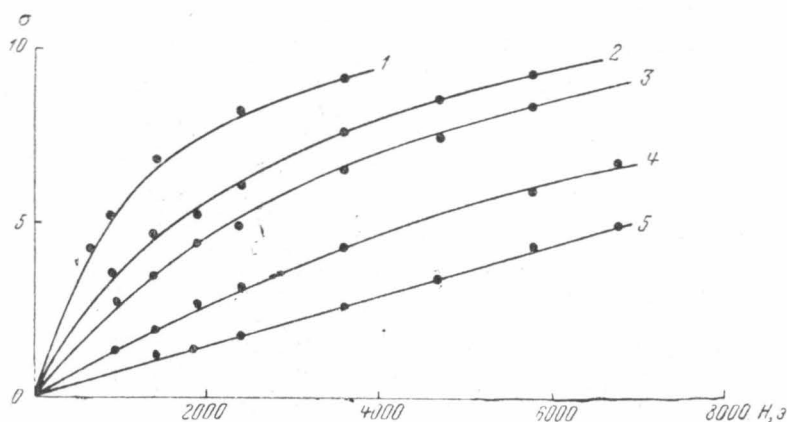


Рис. 2. Кривые намагничивания феррита $Ni_{0,7}Zn_{0,3}Fe_2O_4$ при различных температурах: 1 — 685° , 2 — 689° , 3 — 695° , 4 — 701° , 5 — 710°

ферромагнитной точке Кюри, ярко выражена зависимость удельной восприимчивости χ от напряженности, которая с увеличением температуры постепенно уменьшается. При более высоких температурах удельная восприимчивость практически перестает зависеть от напряженности, кривая намагниченности представляется в этом случае линейной функцией.

Анализ изотерм кривых намагничивания показывает, что при температурах, наиболее близких к ферромагнитной точке Кюри, член $\sim \sigma^3$ в соотношении (1) играет значительную роль уже в полях порядка 1000—1500 э, причем с увеличением напряженности поля эта роль становится все заметнее. С ростом температуры значение второго члена в соотношении (1) уменьшается и зависимость удельной намагниченности от напряженности становится практически линейной. Аналогичная в общем картина в переходной области наблюдалась и раньше при исследовании ферромагнитных металлов, сплавов и простых ферритов [1].

Таким образом, обнаруженные закономерности, очевидно, являются достаточно общими для ферромагнетиков и обусловлены, по-видимому, эффектами ближнего магнитного порядка в ориентации спинов вблизи точки Кюри. Неоднородность исследуемых образцов, которая является несомненно также одной из причин размытия ферромагнитного превращения, приводит к дополнительному расширению переходной области. Что касается коэффициентов α и β , которые определяют ход кривых намагничивания, то они в сильной степени зависят от температуры и содержания окиси цинка в ферритах. Поскольку ферромагнитные

точки Кюри исследованных ферритов изменяются в широких пределах, то для установления некоторых общих закономерностей на рис. 3 построена зависимость коэффициента α от T/θ_f . Коэффициенты α и β во всей области изменения температур сохраняют положительные значения ($\alpha > 0$, $\beta > 0$), причем с увеличением температуры они имеют тенденцию к возрастанию. Коэффициент α вблизи точки Кюри зависит от температуры по линейному закону и стремится к нулю при $T \rightarrow \theta_f$. Коэффициент β зависит от температуры более сложным образом и при $T \rightarrow \theta_f$ имеет, по-видимому, минимальное значение. С ростом

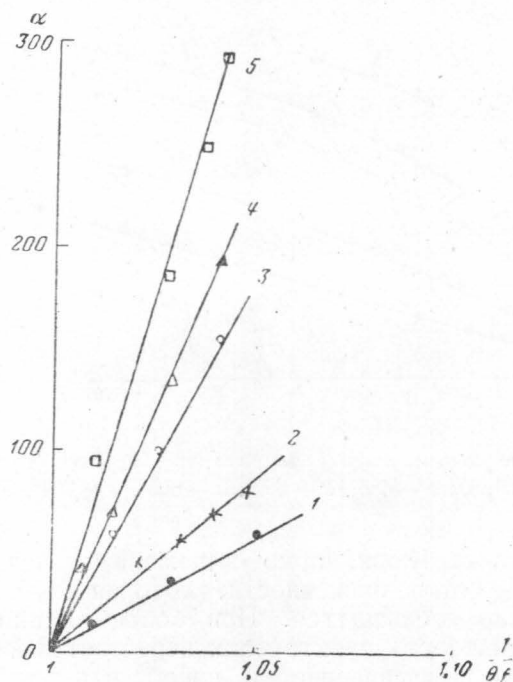


Рис. 3. Зависимость коэффициента α от T/θ_f для ферритов: 1 — $\text{Ni}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Fe}_2\text{O}_4$; 2 — $\text{Ni}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4$; 3 — $\text{Ni}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}\text{Fe}_2\text{O}_4$; 4 — $\text{Ni}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{Fe}_2\text{O}_4$; 5 — $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$

содержания окиси цинка в феррите до 0,5 коэффициент α увеличивается, после чего значение этого коэффициента несколько уменьшается (установлено для ферритов $\text{Ni}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и $\text{Ni}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$). На рис. 4 показана зависимость ферромагнитной точки Кюри от содержания окиси цинка для медленно охлажденных образцов никель-цинкового феррита. Значения ферромагнитной точки Кюри определялись на основании равенства коэффициента α нулю в точке Кюри. Таким же способом находились значения ферромагнитной точки Кюри в работе [4], с той только разницей, что там исследования проводились в ферромагнитной области. Как видно из рис. 4, с увеличением содержания окиси цинка в феррите значение ферромагнитной точки Кюри уменьшается. У цинкового феррита ферромагнитная точка Кюри находится, очевидно, вблизи абсолютного нуля.

Для выяснения влияния режима термической обработки на магнитные свойства ферритов в переходной области образцы обжигались в течение 10 часов при 1200° , а затем закалялись в воде. Закалка приводит к заметному повышению ферромагнитной точки Кюри. Для феррита с 0,7% содержания окиси цинка ферромагнитная точка Кюри увеличивается от 295 до 343°K . Для ферритов с 0,6 и 0,5% содержания цинка она соответственно возрастает от 400 до 460°K и от 532 до 561°K . В переходной области закаленные образцы в основном

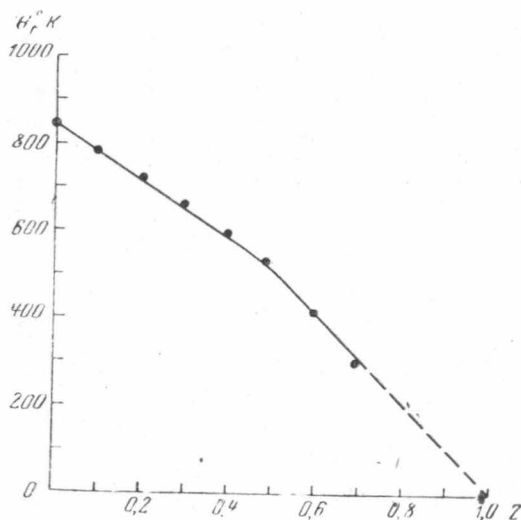


Рис. 4. Зависимость ферромагнитной точки Кюри от содержания окиси цинка

имели закономерности того же характера, что и медленно охлажденные.

Проведенные нами предварительные исследования на закаленных образцах не дают возможности сделать окончательный вывод о влиянии закалки на магнитные свойства этой системы. Поэтому представляет интерес исследовать более подробно никель-цинковые ферриты при различных режимах термической обработки.

В заключение авторы выражают признательность Д. И. Волкову за дискуссию и ценные замечания по настоящей работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков Д. И. и Чечерников В. И. Изв. АН СССР, сер. физ. 8, 1111, 1957; Н. Д. В. Ш., сер. физика, 2, 1958.
2. Rauthemt R. App. phys., 7, 710, 1952.
3. Чечерников В. И. и Волков Ю. Д. ЖЭТФ, 4 (10), 1958.
4. Белов К. П. и Горяга А. Н. ФММ, 2, 3, 1956.

Поступила в редакцию
7.10 1958 г.

Кафедра магнетизма