

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНА ПРИБЛИЖЕНИЯ К НАСЫЩЕНИЮ НА СПЛАВАХ НИКЕЛЯ С КРЕМНИЕМ

Л. В. Киренский, Г. М. Родичев

Исследована зависимость коэффициентов в законе приближения к насыщению от содержания кремния, а также изучена зависимость восприимчивости парапроцесса от намагничивающего поля.

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучению поведения поликристаллических ферромагнетиков в сильных полях было посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ [1 — 15], результатом которых явилось установление закона приближения к насыщению в виде формул

$$i = i_s \left(1 - \frac{a}{H} - \frac{b}{H^2} - \frac{c}{H^3} \right) + i_p, \quad (1)$$

$$\chi = \frac{A}{H^2} + \frac{B}{H^3} + \frac{C}{H^4} + \chi_p, \quad (2)$$

где i — намагниченность ферромагнетика в магнитном поле напряженности H , i_s — спонтанная намагниченность, i_p — намагниченность за счет парапроцесса, χ — дифференциальная восприимчивость, χ_p — восприимчивость парапроцесса, a, b, c и A, B, C — некоторые коэффициенты, зависящие от магнитных констант ферромагнетика, а также от внутренних и внешних напряжений и немагнитных включений.

Большинство работ по исследованию закона приближения к насыщению проводилось на чистых ферромагнитных материалах. Ввиду этого представляет интерес проведение исследования закона приближения к насыщению на сплавах.

В настоящей работе было предпринято такое исследование на сплавах никеля с кремнием. Благодаря тому, что эти сплавы имеют низкие точки Кюри, можно было ожидать, что в них должен быть сильно выражен парапроцесс, который можно будет исследовать в относительно слабых полях.

Согласно теории Хольштейна и Примакова [7], восприимчивость парапроцесса зависит от поля по закону $\chi_p = \frac{p}{H^2}$. Эта зависимость

была экспериментально обнаружена только Парфёновым [15]. Остальные исследователи не смогли заметить этой зависимости, так как при их методе исследования область применяемых полей была недостаточно широка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

В работе исследовалась зависимость дифференциальной восприимчивости образцов от поля. Для измерения дифференциальной восприимчивости использовалась установка, описанная в статье [16]. В качестве объектов исследования были взяты образцы с содержанием 4, 3 и 0,5% кремния, длиной 17—18 см, диаметром 1 мм и образцы с двухпроцентным содержанием кремния, диаметром 0,4 мм (ввиду ограниченной чувствительности установки при исследовании последнего сплава в измерительную катушку помещалось сразу 5 образцов). Опыты проводились при температуре 22°C.

При обработке результатов измерений, проведенных на неотожженных образцах, предполагалось, что ход дифференциальной восприимчивости достаточно хорошо описывается формулой

$$\chi = \frac{A}{H^2} + \frac{B}{H^3}, \quad (3)$$

откуда

$$\chi H^3 = AH + B.$$

Приведенные на рис. 1 графики зависимостей χH^3 от H в слабых полях представляют собой прямые, отсекающие на оси ординат отрицательные отрезки, а в более сильных полях переходят в прямые, отсекающие на оси ординат положительные отрезки.

Из (3) следует, что отрезок на оси ординат, отсекаемый продолжением прямой, равен B .

Согласно теории закона приближения к насыщению [11—14], коэффициент B должен быть существенно положительным. Однако отрицательные значения коэффициента B получались и ранее другими исследователями [17, 18], объясняющими отрицательные значения коэффициентов B появлением отрицательных слагаемых, порождаемых напряжениями особого рода, которые не учитываются при вычислении коэффициента B в работах [11—14].

В нашем случае отрицательные значения B , по-видимому, объясняются тем, что для этой области полей закон приближения к насыщению еще неприменим.

Из рис. 1 видно, что область перехода к прямым, дающим положительный отрезок на оси ординат, с увеличением содержания кремния смещается в область более слабых полей.

Абсолютные же значения как положительных, так и отрицатель-

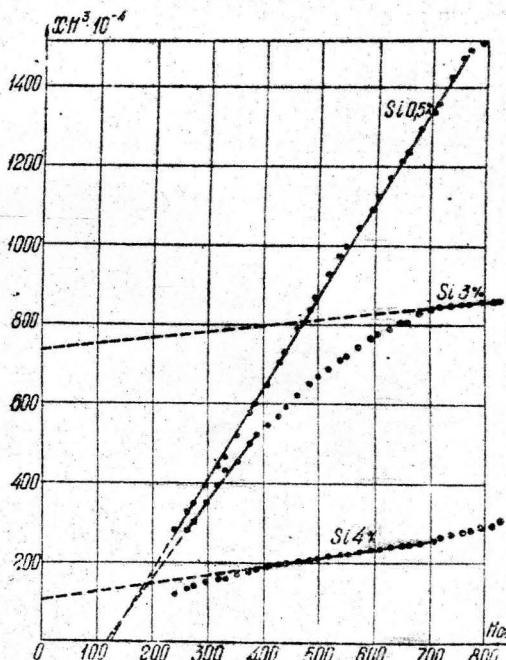


Рис. 1. Зависимость χH^3 от H . Образцы с содержанием кремния 0,5, 3 и 4% (неотожженные).

ных отрезков, отсекаемых на оси ординат, с увеличением содержания кремния уменьшаются.

Далее исследуемые образцы были подвергнуты трехкратному отжигу в течение двух часов в вакууме при температуре 1000°C.

При обработке результатов измерений, проведенных на отожженных образцах, оказалось, что закон приближения к насыщению в форме (3) неприемлем, так как графики зависимостей χH^3 от H не представляют собой прямых (рис. 2). Ход этих графиков указывает на то, что для данных образцов большую роль играют члены с большими степенями H , чем $\frac{A}{H^2}$ и $\frac{B}{H^3}$, при этом роль этих членов возрастает с увеличением содержания кремния.

Графики зависимости χH^3 от H (рис. 3), построенные для образцов $\text{Si } 3\%$ и $\text{Si } 4\%$, показывают, что в восприимчивости первого образца в полях выше 650 э основную роль играет член $\frac{P}{H^2}$ (график

представляет собой прямую, продолжение которой проходит через начало координат). Для образца $\text{Si } 4\%$ восприимчивость изменяется близко к закону $H^{-\frac{1}{2}}$ в более слабых полях, а дальше начинают доминировать члены с большими степенями H .

Действительно, график зависимости χ от $H^{-\frac{1}{2}}$ для этого образца близок к прямой (рис. 4), продолжение которой отсекает на оси ординат отрезок, равный $1,0 : 10^{-3}$, т. е. дифференциальная восприимчивость состоит в основном из члена, пропорционального $H^{-\frac{1}{2}}$, и некоторого постоянного члена r , т. е. $\chi = \frac{P}{H^2} + r$.

Для остальных образцов постоянного члена в выражении дифференциальной восприимчивости таким способом обнаружить не удалось.

У образцов с малым содержанием кремния ($\text{Si } 0,5\%$, $\text{Si } 2\%$) графики зависимостей χH^3 от H все-таки довольно близки к прямым,

что говорит о существенной роли членов $\frac{A}{H^2}$ и $\frac{B}{H^3}$. Поэтому было предположено, что для образцов $\text{Si } 0,5\%$, $\text{Si } 2\%$ и $\text{Si } 3\%$ закон приближения к насыщению имеет вид

$$\chi = \frac{A}{H^2} + \frac{B}{H^3} + \frac{P}{H^{\frac{1}{2}}}, \quad (4)$$

причем с увеличением содержания кремния роль членов $\frac{A}{H^2}$ и $\frac{B}{H^3}$

убывает, а роль члена $\frac{P}{H^{\frac{1}{2}}}$ возрастает. Для образца $\text{Si } 4\%$ в исследуемой области полей члены $\frac{A}{H^2}$ и $\frac{B}{H^3}$ незначительны по сравнению

с $\frac{P}{H^{\frac{1}{2}}}$ и r .

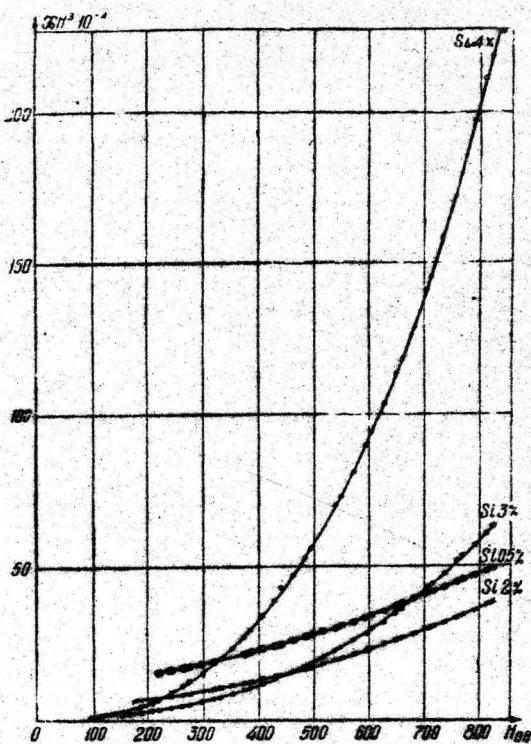


Рис. 2. Зависимость χH^2 от H . Образцы с содержанием кремния 0,5, 2, 3 и 4 % (отожженные).

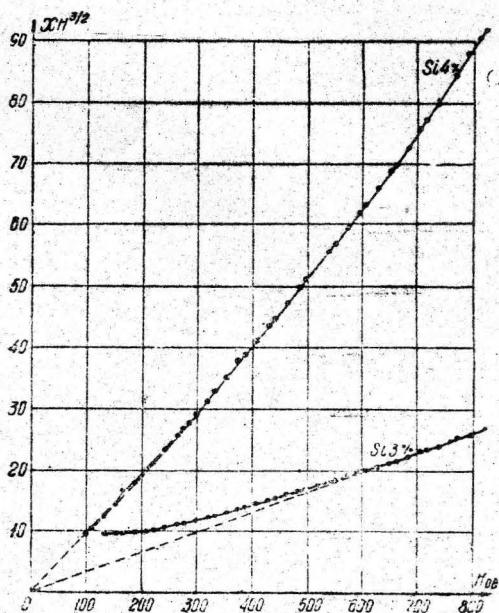


Рис. 3. Зависимость χH^2 от H . Образцы с содержанием кремния 3 и 4 % (отожженные).

Так как определить графическим методом сразу три коэффициента выражения (4) невозможно, то коэффициенты A , B и p определялись путем решения системы четырех уравнений с тремя неизвестными.

Для четырех точек экспериментально полученной кривой можно записать:

$$\left\{ \begin{array}{l} \chi_1 = \frac{A}{H_1^2} + \frac{B}{H_1^3} + \frac{p}{H_1^{\frac{1}{2}}}, \\ \chi_2 = \frac{A}{H_2^2} + \frac{B}{H_2^3} + \frac{p}{H_2^{\frac{1}{2}}}, \\ \chi_3 = \frac{A}{H_3^2} + \frac{B}{H_3^3} + \frac{p}{H_3^{\frac{1}{2}}}, \\ \chi_4 = \frac{A}{H_4^2} + \frac{B}{H_4^3} + \frac{p}{H_4^{\frac{1}{2}}}. \end{array} \right. \quad (5)$$

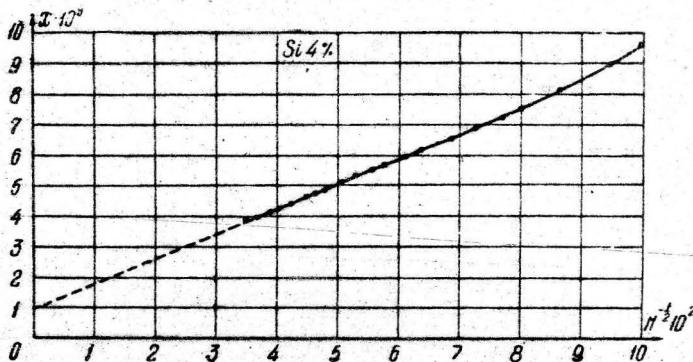


Рис. 4. Зависимость χ от $H^{-\frac{1}{2}}$. Образец с содержанием кремния 4% (отожженный).

Четвертое уравнение было взято для того, чтобы гарантировать результат расчета от каких-либо случайно выпадающих экспериментальных точек, а также для того, чтобы уже в ходе расчета было видно, правильно ли сделано предположение о виде функции.

Для окончательной проверки правильности нахождения коэффициентов были построены графики зависимостей $\chi H^3 - AH$ от $H^{\frac{1}{2}}$ и $\chi H^2 - \frac{B}{H}$ от $H^{\frac{3}{2}}$, которые должны представлять собой прямые согласно $\chi H^3 - AH = B + pH^{\frac{5}{2}}$ и $\chi H^2 - \frac{B}{H} = A + pH^{\frac{3}{2}}$.

Действительно, точки построенных графиков лежали на прямых. Тангенсы угла наклона, как и следовало ожидать, были равны p ; ординаты на оси ординат, отсекаемые продолжением прямых, для первого вида графиков равны B , а для графиков второго вида равны A . На рис. 5, 6 представлены такие графики для образца с содержанием

0,5% кремния). Это указывает на то, что экспериментальные кривые $\chi(H)$ достаточно хорошо описываются формулой

$$\chi = \frac{A}{H^2} + \frac{B}{H^3} + \frac{p}{H^4},$$

где A , B и p — коэффициенты, найденные решением системы (5).

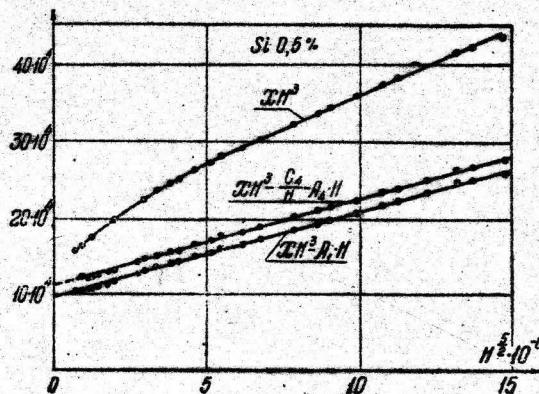


Рис. 5. Зависимость $\chi H^3 - AH$ от H^2
и $\chi H^3 - AH - \frac{C}{H}$ от H^2 . Образец с содержа-
нием кремния 0,5% (отожженный).

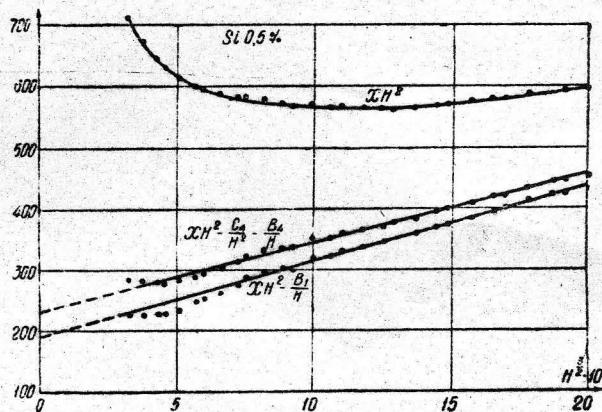


Рис. 6. Зависимости $\chi H^2 - \frac{B}{H^3}$ от H^2 и $\chi H^2 -$
 $\frac{B}{H} - \frac{C}{H^2}$ от H^2 . Образец с содержанием кремния
0,5% (отожженный).

Для образцов Si 0,5% и Si 2% был учтен путем последовательных приближений член $\frac{C}{H^4}$.

Учет члена $\frac{C}{H^4}$ изменил значение коэффициентов A , B и p для этих образцов. На рис. 5, 6 представлены графики зависимостей $\chi H^3 - AH - \frac{C}{H}$ от $H^{\frac{3}{2}}$ и $\chi H^2 - \frac{B}{H} - \frac{C}{H^2}$ от $H^{\frac{3}{2}}$ для образца Si 0,5%.

Эти графики представляют собой также прямые. Это говорит о том, что функция $\chi(H)$ в исследуемой области полей может быть представлена и в форме четырехчлена.

Для образцов Si 3% и Si 4%, ввиду малости константы анизотропии, а следовательно, и коэффициента C учет члена $\frac{C}{H^4}$ не имеет смысла.

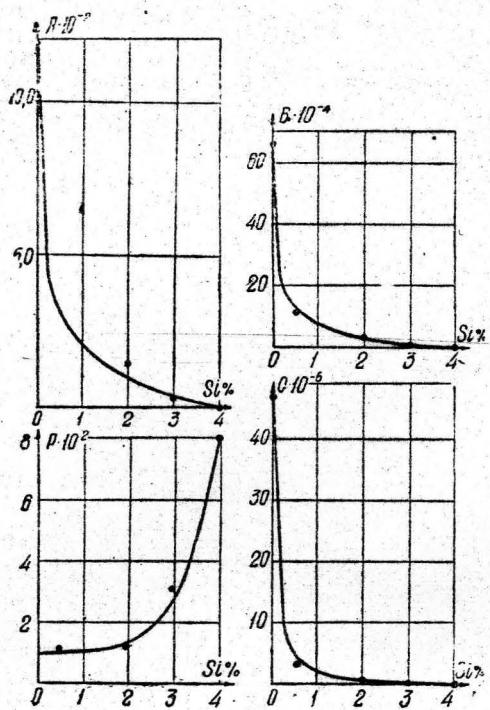


Рис. 7. Зависимости коэффициентов A , B , C и p от процентного содержания кремния в сплаве.

(температура, при которой велись эти исследования, не указана).

На рис. 7, 8 приведены зависимости коэффициентов A , B , C , а также константы анизотропии от процентного содержания кремния. Значения константы анизотропии находились по коэффициентам B .

Видно, что коэффициенты A , B , C , а также константа анизотропии убывают с увеличением содержания кремния сначала быстро, а потом медленно.

Постоянный член r в выражении дифференциальной восприимчивости определялся только для образца Si 4%.

На рис. 7 представлена зависимость коэффициента p от процентного содержания кремния в сплаве. Коэффициент p при 4% кремния, равный 0,081, убывает с уменьшением содержания кремния сначала быстро, а затем примерно от 2% кремния почти не изменяется. Это дает возможность экстраполировать кривую на 0% кремния. Экстраполяция дает для чистого никеля $p = 0,010$. Непосредственное же измерение коэффициента p для чистого никеля в этой области исследуемых полей невозможно.

Согласно теории Хольштейна и Примакова [7], член $\frac{p}{H^{\frac{1}{2}}}$ является не чем иным, как восприимчивостью параллельного процесса. Эта теория для температуры 22°C (при которой велись исследования в настоящей работе) дает $p = 0,0088$.

Значение коэффициента p для никеля, по измерениям Парфенова [15], равно 0,014

исследования, не указана).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные на сплавах никеля с кремнием, показали, что с увеличением содержания кремния в сплаве применимость закона приближения к насыщению смещается в область более слабых полей. Это обстоятельство позволило исследовать на этих сплавах восприимчивость парапроцесса.

Опыты показали, что восприимчивость парапроцесса выражается формулой $\chi = \frac{p}{H^2}$, где

p — некоторая постоянная. Найденная зависимость коэффициента p от содержания кремния позволила найти значение этого коэффициента для чистого никеля путем экстраполяции. Значение коэффициента p , найденное таким образом, близко к теоретическому значению этого коэффициента, полученного из теории Хольштейна и Примакова [7], и по порядку величины согласуется с данными, полученными Парфеновым [15].

Измерения на образцах с содержанием кремния 4% показали, что в дифференциальной восприимчивости этого образца имеется в виде слагаемого член r , не зависящий от поля.

Коэффициенты A , B , C , а также константа анизотропии K_1 с увеличением содержания кремния уменьшаются сначала быстро, а затем более медленно.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Акулов Н. С. *Zs. f. Phys.*, **69**, 822, 1931. [2] E. Czerlinsky. *Ann. d. Phys.* **13**, 80, 1932. [3] R. Gans. *Ann. d. Phys.*, **15**, 28, 1932. [4] Steinhaus, Kussman und Schoen. *Phys. Zs.*, **39**, 777, 1937. [5] H. Polley. *Ann. d. Phys.*, **36**, 625, 1939. [6] Акулов Н. С. и Киренский Л. В. *ЖТФ*, **9**, 1145, 1939. [7] T. Holstein und H. Primakoff. *Phys. Rev.*, **58**, 1098, 1940. [8] W. Brown. *Phys. Rev.*, **58**, 736, 1940. [9] W. Brown. *Phys. Rev.*, **60**, 139, 1941. [10] Акулов Н. С. и Мирясов Н. З. *ДАН СССР*, **66**, 29, 1949. [11] Киренский Л. В. и Слободской Л. И. *ДАН СССР*, **69**, 639, 1949. [12] Киренский Л. В. и Слободской Л. И. *ДАН СССР*, **70**, 809, 1949. [13] Киренский Л. В. и Слободской Л. И. *ДАН СССР*, **74**, 457, 1950. [14] Киренский Л. В. и Слободской Л. И., Ученые записки МГУ, в. 162, кн. 6, 139, 1952. [15] Парфенов В. В. Изв. АН СССР, сер. физ., **16**, 601, 1952. [16] Киренский Л. В. и Родичев Г. М. Изв. вузов МВО СССР, Физика (в печати). [17] Акулов Н. С. и Большова К. М. *Вестник МГУ* № 9, 79, 1950. [18] Большова К. М. Изв. АН СССР, сер. физ. **16**, 590, 1952.

Красноярский
пединститут

Поступила в редакцию
10 февраля 1958 г.

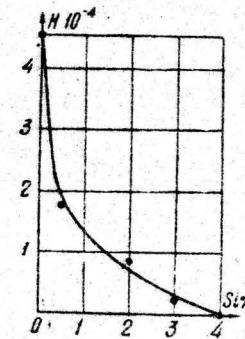


Рис. 8. Зависимость константы анизотропии K_1 от процентного содержания кремния в сплаве.