

## 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,  $\chi$  — дифференциальная восприимчивость,  $\chi_p$  — 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  $\chi H^3$  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-

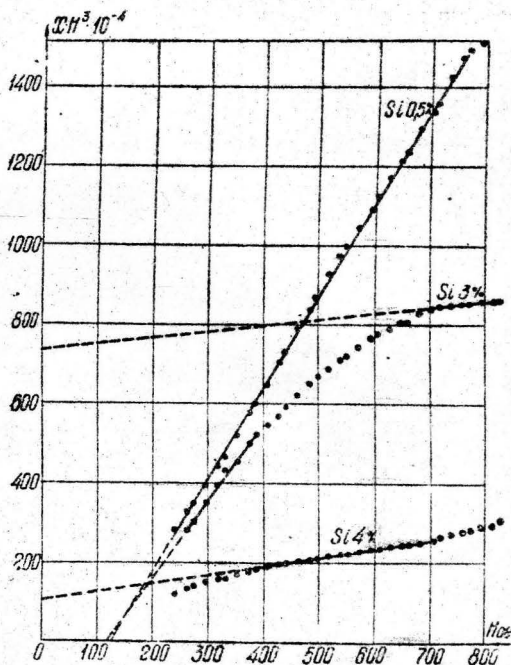


Рис. 1. Зависимость  $\chi H^3$  от  $H$ . Образцы с содержанием кремния 0,5, 3 и 4% (неотожженные).

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  $\chi H^3$  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  $\chi H^3$  от  $H$  (рис. 3), построенные для образцов Si 3% и Si 4%, показывают, что в восприимчивости первого образца в полях выше 650 э основную роль играет член  $\frac{p}{H^{\frac{1}{2}}}$  (график

представляет собой прямую, продолжение которой проходит через начало координат). Для образца 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  $\chi$  от  $H^{-\frac{1}{2}}$  для этого образца близок к прямой (рис. 4), продолжение которой отсекает на оси ординат отрезок, равный  $1,0 \cdot 10^{-3}$ , т. е. дифференциальная восприимчивость состоит в основном из члена, пропорционального  $H^{-\frac{1}{2}}$ , и некоторого постоянного члена  $r$ , т. е.  $\chi = \frac{p}{H^{\frac{1}{2}}} + r$ .

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

У образцов с малым содержанием кремния (Si 0,5%, Si 2%) графики зависимостей  $\chi H^3$  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 Si 0,5%, Si 2% и 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 Si 4% в исследу-

емой области полей члены  $\frac{A}{H^2}$  и  $\frac{B}{H^3}$  незначительны по сравнению

с  $\frac{p}{H^{\frac{1}{2}}}$  и  $r$ .

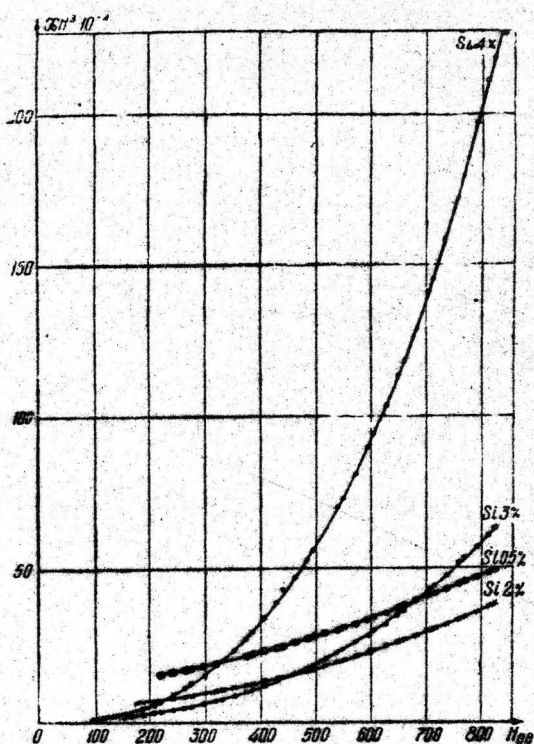


Рис. 2. Зависимость  $\chi H^3$  от  $H$ . Образцы с содержанием кремния 0,5, 2, 3 и 4 % (отожженные).

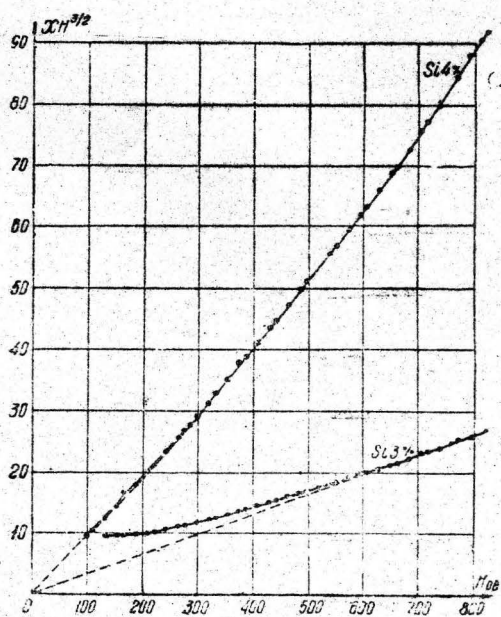


Рис. 3. Зависимость  $\chi H^{3/2}$  от  $H$ . Образцы с содержанием кремния 3 и 4% (отожженные).



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:

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

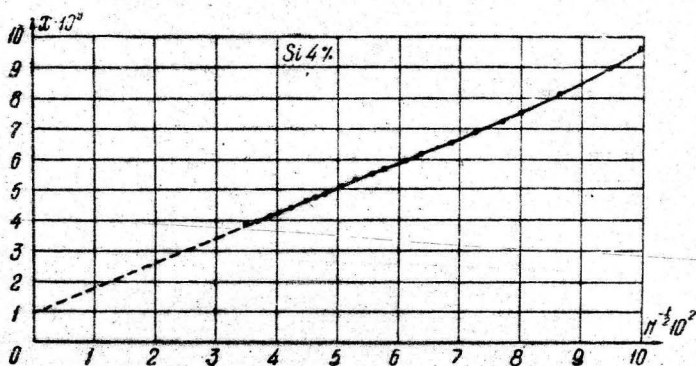


Рис. 4. Зависимость  $\chi$  от  $H^{-\frac{1}{2}}$ . Образец с содержанием кремния 4% (отожженный).

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

$$\chi H^3 - AH = B + pH^{\frac{1}{2}} \quad \text{и} \quad \chi H^2 - \frac{B}{H} = A + pH^{\frac{3}{2}}.$$

Действительно, точки построенных графиков лежали на прямой. Тангенсы угла наклона, как и следовало ожидать, были равны  $p$ ; отрезки 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).

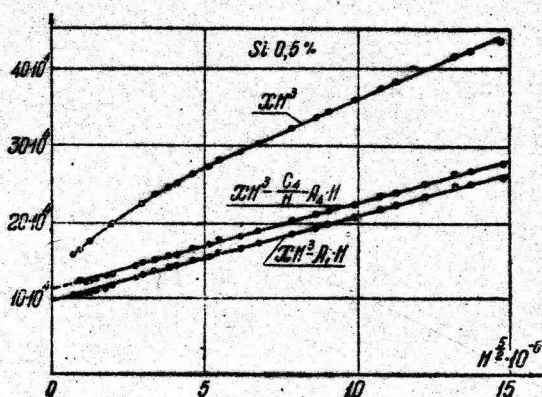


Рис. 5. Зависимость  $\chi H^3 - AH$  от  $H^{5/2}$  и  $\chi H^3 - AH - \frac{C}{H}$  от  $H^{5/2}$ . Образец с содержанием кремния 0,5% (отожженный).

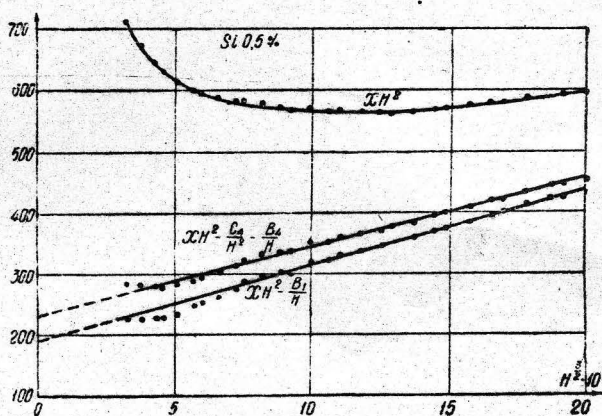


Рис. 6. Зависимости  $\chi H^2 - \frac{B}{H}$  от  $H^{3/2}$  и  $\chi H^3 - \frac{B}{H} - \frac{C}{H^2}$  от  $H^{3/2}$ . Образец с содержанием кремния 0,5% (отожженный).

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.

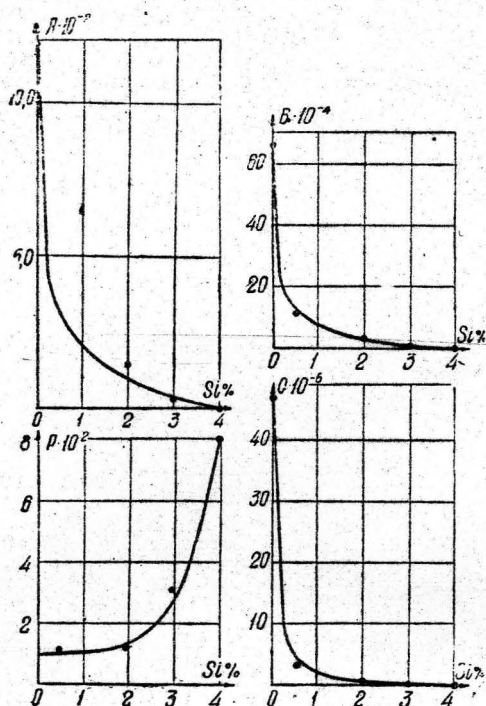


Рис. 7. Зависимости коэффициентов  $A, B, C$  и  $p$  от процентного содержания кремния в сплаве.

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 парапроцесса. 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

(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%.

## 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  $\chi = \frac{p}{H^{\frac{1}{2}}}$ , 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.

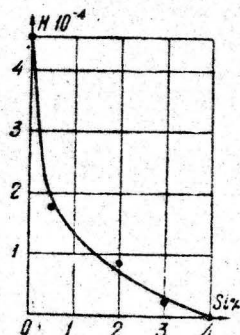


Рис. 8. Зависимость константы анизотропии  $K_1$  от процентного содержания кремния в сплаве.

## 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 and 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 1953 г.