

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА КОЭРЦИТИВНУЮ СИЛУ МАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА С МНОГОДОМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Акимова Анастасия Андреевна

студентка

Московский государственный технический университет им. Н.Э Баумана, г. Москва

**Аннотация.** В данной статье описывается влияние факторов на коэрцитивную силу магнитного материала с многодоменной структурой

**Ключевые слова:** сплавы, коэрцитивная сила, железо, обработка.

Химический и фазовый составы оказывают существенное влияние на коэрцитивную силу сплава, так как они определяют значение почти всех констант и коэффициентов, входящих в формулу (1). Для установления влияния изменения химического состава сплава на его коэрцитивную силу необходимо проанализировать диаграмму фазового равновесия и выяснить, какие фазовые изменения при этом происходят.

Для примера рассмотрим диаграмму фазового равновесия сплавов с ограниченной растворимостью компонентов (рис. 1). Один из компонентов  $A$  ферромагнитен, другой  $B$  немагнитен. С повышением содержания в сплаве компонента  $B$  до предела растворимости ( $n\%B$ ), пока сплав остается однофазным, коэрцитивная сила может либо незначительно увеличиваться  $1$  из-за искажений кристаллической решетки, вызванных атомами легирующего элемента, либо несколько уменьшаться  $2$ , так как в ряде случаев легирование сопровождается уменьшением  $\lambda_s$  и  $K$ .

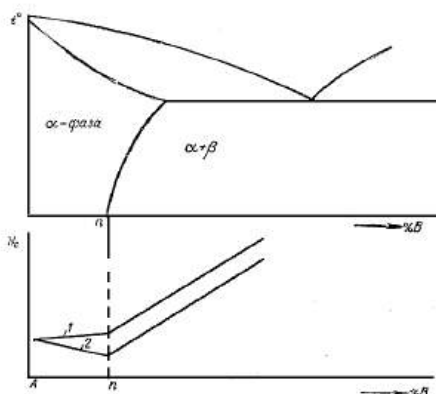


**Рис.1.** Диаграмма состояний сплавов с ограниченной растворимостью компонентов и изменение коэрцитивной силы сплавов в зависимости от химического состава.

Например, при легировании железа кремнием и некоторыми другими элементами коэрцитивная сила уменьшается из-за ряда причин, в том числе уменьшения  $\lambda_s$ . С появлением в сплаве второй (неферромагнитной) фазы коэрцитивная сила резко возрастает вследствие значительного увеличения коэффициента и внутренних напряжений  $\Delta\sigma_i$ .

Холодная пластическая деформация, сопровождающаяся сильным искажением решетки, измельчением зерен и, как следствие, увеличением, приводит к значительному повышению. Коэрцитивная сила сплавов под влиянием наклепа может увеличиваться в два-три раза, а  $\mu_{\max}$  — уменьшаться в несколько раз. Для магнитно-твердых материалов наклеп принципиально полезен, а для магнитно-мягких чрезвычайно вреден. Поэтому магнитопроводы из магнитно-мягких материалов после изготовления подвергают непременно рекристаллизационному отжигу для снятия наклепа. После отжига сердечники следует предохранять от деформирования, чтобы не создавать внутренних напряжений.

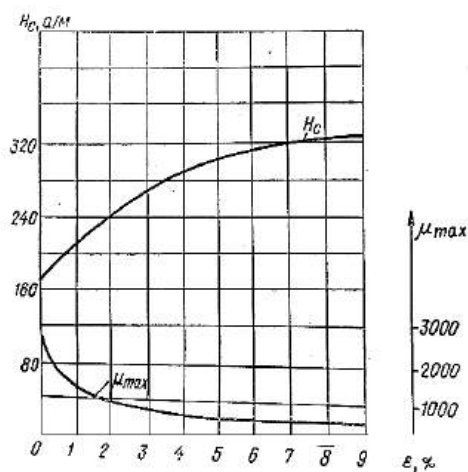


**Рис.2.** Влияние степени деформации на  $H_c$  и  $\mu_{\max}$  малоуглеродистой стали.

Термическая обработка сплавов на коэрцитивную силу может влиять по-разному. Всякая термическая обработка, приближающая структуру сплава к равновесной и уменьшая  $\Delta\sigma_i$  (в первую очередь отжиг металлов и сплавов), снижает  $H_c$ .

Закалка стали и дисперсионное твердение сплавов вследствие резкого повышения уровня внутренних напряжений вызывают значительное повышение коэрцитивной силы.

*Величина зерна.* Межзёренные границы вследствие скопления всевозможных дефектов (дислокации, примесных атомов) создают высокий градиент внутренних напряжений и тем самым способствуют повышению коэрцитивной силы сплава. Укрупнение зерен сопровождается уменьшением  $H_c$ . Поэтому в магнитно-мягких сплавах стремятся вырастить зерно до размеров толщины листа.

*Температура.* Влияние температуры на  $H_c$  сплава связано с изменением констант  $\lambda_s$  и  $K$ . С повышением температуры магнитострикция насыщения и константа магнитной анизотропии у большинства ферромагнетиков уменьшаются и в точке Кюри становятся равными нулю.

(рис.3). Кроме того, при нагреве снижается уровень внутренних напряжений в материале. Поэтому  $H_c$  ферромагнетиков по мере повышения температуры падает, а проницаемость  $\mu_a$  ( $\mu_{max}$ ) изменяется по кривой с максимумом.

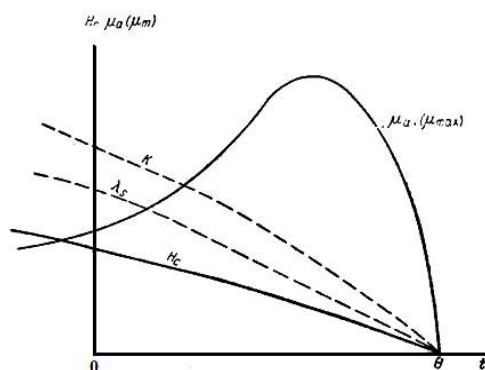


**Рис.3.** Изменение  $\mu_{max}$ ,  $\lambda_s$ ,  $K$  и  $H_c$  сплавов с температурой.

Рассмотрим в качестве примера технически чистое железо. Подставив в формулу (1) параметры для отожженного железа.

$$(p = 0,1 \quad \alpha = 0,03 \quad \lambda_s = 20 \cdot 10^{-6}, \Delta\sigma_i = 200 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}, K = 4,2 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}, \mu_0 J_S = 2,16 \text{ тл})$$

получим

$$H_c = 0,1 \cdot 0,03 \frac{\frac{3}{2} \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^6 + 4,2 \cdot 10^4}{2,16} = 67 \frac{\text{а}}{\text{м}},$$

т. е. железо - типичный магнитно-мягкий материал (вычисленная величина  $H_c$  весьма хорошо совпадает с измеренной)

С целью повышения коэрцитивной силы железо можно легировать углеродом (для повышения  $\Delta\sigma_i$ , - путем закалки полученной таким образом стали), Сг и W (для получения немагнитных карбидов в стали), Со (для повышения  $\lambda_s$ ). Легированная перечисленными элементами и закаленная на мартенсит сталь также имеет многодомённое строение, для оценки ее коэрцитивной силы применима теория включений. Подставив в формулу (1) максимально возможные значения параметров

$$(p = 1, \quad \alpha = 0,3, \quad \lambda_s = 42,0 \cdot 10^{-6}, \quad \Delta\sigma_i = 1000 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}, \quad K = 10 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}, \\ \mu_0 J_S = 2,0 \text{ тл},$$

получим

$$H_c = 1 \cdot 0,3 \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot 42,0 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 10^6 + 10 \cdot 10^4}{2} = 23\,500 \text{ а/м}$$

На практике такую коэрцитивную силу имеют некоторые высококобальтовые стали, применяемые для постоянных магнитов. При многодоменной структуре материала получить

коэрцитивную силу выше этого значения невозможно, так как при оценке в формулу были поставлены практически предельные значения параметров.

#### **Список литературы:**

1. Щербинин В.Е. Магнитные методы дефектоскопии и структурного анализа металлов [электронное издание]. / Щербинин В.Е., Костин В.Н. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007, Бакунов А.С. Магнитный контроль: уч. пособие / Бакунов А.С., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е.; под общ. ред. В.В. Клюева – 1-е изд. – М.: Спектр, 2011. – 192 с.
2. Шелихов Г.С. Магнитопорошковый контроль: уч. пособие / Шелихов Г.С., Глазков Ю.А.; под общ. ред. В.В. Клюева – 1-е изд. – М.: Спектр, 2011. – 184 с.
3. Федосенко Ю.К. Вихретоковый контроль: уч. пособие / Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г.; под общ. ред. В.В. Клюева – 1-е изд. – М.: Спектр, 2011. – 224 с.
4. Клюев С.В. Комбинированные методы вихретокового, магнитного и электропотенциального контроля: уч. пособие / Клюев С.В., Шкатов П.Н.; под общ. ред. В.В. Клюева – 1-е изд. – М.: Спектр, 2011. – 191 с.