

ФИЗИКА

Действительный член АН-БССР Н. С. АКУЛОВ и К. М. БОЛЬШОВА

О ЗАКОНЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ К НАСЫЩЕНИЮ ДЛЯ МАРТЕНСИТА

1. Закон приближения к насыщению поликристаллического ферромагнетика в общем случае выражается, как известно, следующим образом:

$$\chi = \chi_p + \frac{A}{H^2} + \frac{B_0}{H^3} + \frac{C_0}{H^4}. \quad (1)$$

Здесь члены χ_p и B_0/H^3 рассчитаны из представления о парапроцессе и намагничении путем вращения макродоменов ⁽¹⁾. Коэффициент B_0 существенно положителен. Как показал расчет, знак коэффициента при члене $1/H^3$ не меняется, т. е. остается положительным и при действии в металле диффузных внутренних напряжений ⁽²⁾. Член C_0/H^4 рассчитан Гансом ⁽³⁾ по данному Акуловым методу. C_0 может менять знак в зависимости от знака константы энергетической анизотропии. Наконец, появление члена A/H^2 в законе подхода к насыщению, как показал Броун ⁽⁴⁾, связано с существованием в металле резко неоднородных внутренних напряжений.

Широкое применение этого закона к различным сплавам показало, что все выводы теории согласуются с опытом. При этом исследовались в основном чистые металлы и равновесные твердые растворы.

В целях дальнейшего развития теории исключительно важное значение приобретают неравновесные твердые растворы, где возможны сильные резко неоднородные локальные напряжения, а также гетерогенные сплавы.

Изучению закона подхода к насыщению для таких случаев и посвящено данное исследование.

При этом обнаружилось, что локальные напряжения приводят не только к появлению члена A/H^2 , который здесь играет основную роль, но и других членов типа B''/H^3 , C''/H^4 и т. д. Коэффициенты B'' и C'' обусловлены уже не процессом вращения макродоменов, а изменением ориентации микродоменов; а потому, как показывает опыт, могут иметь иные знаки, чем B_0 и C_0 .

Таким образом, в общем случае закон подхода к насыщению должен быть записан в виде:

$$\chi = \chi_p + \frac{A}{H^2} + \frac{B_0 + B' + B''}{H^3} + \frac{C_0 + C' + C''}{H^4} + \dots, \quad (2)$$

где χ_p , B_0 , C_0 — коэффициенты, находимые из теории Акулова; B' , C' — коэффициенты, определяющиеся диффузными внутренними напряжениями ⁽²⁾; A , B'' , C'' — коэффициенты, обусловленные сильными локальными напряжениями, а также наличием включений.

2. Изучение области подхода к насыщению и измерение константы энергетической анизотропии поликристаллических сплавов до сих пор производилось только на постоянном токе. Баллистическим методом измерялась дифференциальная восприимчивость в области подхода к насыщению и по формуле Акулова рассчитывалась первая константа энергетической анизотропии. В данной работе был разработан совершенно иной метод, основанный на измерении дифференциальной восприимчивости в пульсирующем магнитном поле. Испытуемый образец служил при этом сердечником трансформатора. Первичная обмотка использовалась в качестве подмагничивающей; вторичная — индикаторной. Применение переменного тока позволило поставить в индикаторной цепи усилитель и тем самым очень сильно повысить чувствительность. Испытания метода показали, что он значительно чувствительнее баллистического; можно работать с образцами в виде проволок диаметром 1—2 мм и менее.

3. Исследованию подвергались четыре марки углеродистых сталей с содержанием углерода: 0,49; 0,75; 1,03; 1,12%. Из каждой марки стали было изготовлено по несколько эллипсоидов с осями 120 и 6 мм. Все образцы были вначале закалены из области γ -фазы в воду, а потом охлаждены жидким азотом с целью большего разложения остаточного аустенита. Вышеописанным методом на всех образцах в зака-

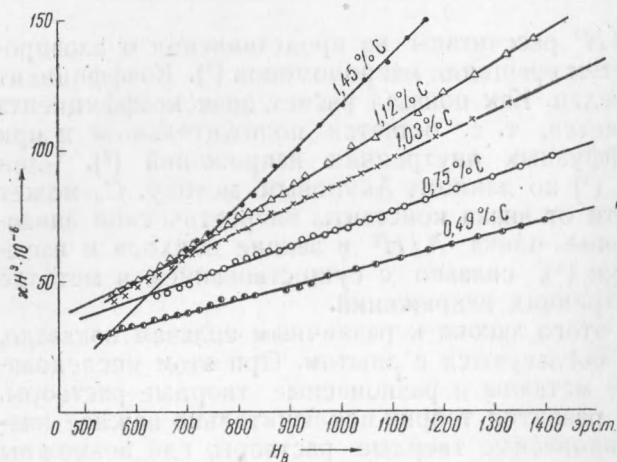


Рис. 1

ленном состоянии была промерена дифференциальная восприимчивость в области подхода к насыщению, в зависимости от поля. Затем часть образцов была подвергнута двухчасовому отпуску при температурах 100, 150, 200, 250, 350°. На всех этих образцах также были проведены измерения дифференциальной восприимчивости в области полей 600—1500 эрстед.

Как было указано выше, появление члена A/H^2 закона подхода

к насыщению ⁽¹⁾ связано с существованием в металле резко неоднородных напряжений особого рода, действующих на расстоянии, сравнимом с параметром решетки. Напряжения такого рода должны быть особенно велики в сталях, закаленных на мартенсит ⁽⁵⁻⁷⁾. Следовательно, в законе подхода к насыщению закаленных и отпущенных сталей большую роль должен играть член A/H^2 .

При обработке результатов измерения был применен закон подхода к насыщению в виде:

$$\chi = \chi_p + A/H^2 + B/H^3. \quad (3)$$

Так как в рассматриваемом нами интервале полей значения дифференциальной восприимчивости были очень велики по сравнению с парамагнитной восприимчивостью, то для упрощения χ_p мы пренебрегали. Тогда закон подхода к насыщению можно представить в виде:

$$\chi H^3 = AH + B. \quad (4)$$

Для вычисления поля H определялся размагничивающий фактор по идеальной кривой.

В качестве примера на рис. 1 приведены прямые, характеризующие зависимость χH^3 от H для закаленных образцов. Для отпущенных образцов были получены аналогичные семейства прямых. По тангенсу угла наклона этих прямых с осью абсциссы определяли коэффициент A при члене $1/H^2$. По отрезку, отсекаемому на оси ординат, — коэффициент B при члене $1/H^3$.

Из рис. 1 следует, что A возрастает с увеличением количества углерода в мартенсите. Зависимость коэффициента A от температуры отпуска приведена на рис. 2 для стали с различным содержанием углерода. Значения A по оси ординат соответствуют закаленному состоянию. По мере уменьшения процента углерода в стали и увеличения температуры отпуска величина коэффициента A уменьшается. Тот факт, что коэффициент A не меняется при отпуске до 100° , можно объяснить тем, что в процессе отпуска на коэффициент A действуют в противоположную сторону два явления. С одной стороны, выделение углерода из твердого раствора (как показывает рис. 2, A тем меньше, чем меньше содержание углерода в стали) и уменьшение напряжений, вследствие нагрева, приводят к уменьшению A ; с другой стороны, появление гетерогенности, повиди-

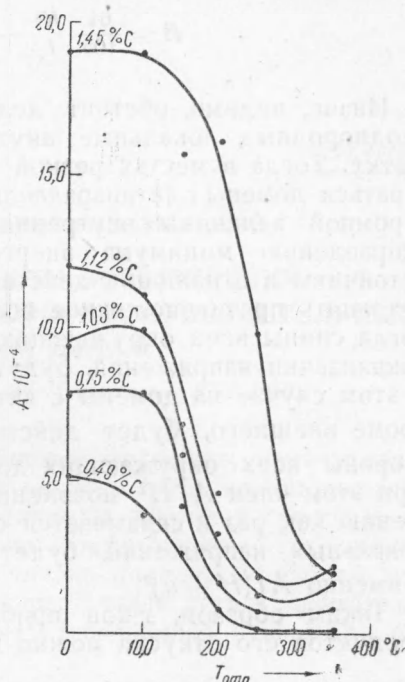


Рис. 2

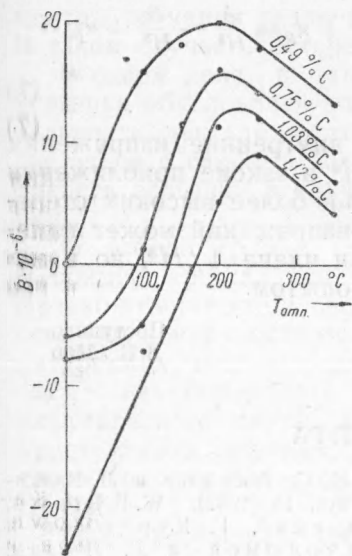


Рис. 3

мому, увеличивает A . При отпуске в интервале $100-350^\circ$ происходит более значительное уменьшение A , вследствие выделения углерода из раствора, а также уменьшения напряжений второго и третьего рода, чем увеличение A вследствие изменения гетерогенности.

Как указывалось выше, величина отрезка, отсекаемого прямыми, изображенными на рис. 1, на оси ординат, дает коэффициент B при члене $1/H^3$ закона подхода к насыщению (4). На рис. 3 дана зависимость коэффициента B от температуры отпуска сталей с различным содержанием углерода. Из рисунка видно, что до 250° B увеличивается с повышением температуры отпуска, после 250° падает для всех исследованных сталей. Обращает на себя внимание тот факт, что в закаленном состоянии для сталей с содержанием углерода 0,75; 1,03; 1,12% коэффициент B имеет отрицательный знак. Абсолютная величина его тем больше, чем больше углерода

в растворе. Это говорит о том, что анизотропия мартенсита определяется в основном действующими в нем напряжениями.

Следует отметить, что диффузные внутренние напряжения не могут изменить знака B . Действительно, согласно теории Н. С. Акулова и Л. В. Киренского⁽²⁾, в случае действия в металле диффузных внутренних напряжений

$$B = \frac{64}{105} \frac{K^2}{I_s} + \frac{6}{25I_s} (2\lambda_{100}^2 + 3\lambda_{111}^2) \sigma_i^2. \quad (5)$$

Иначе, видимо, обстоит дело, если в металле действуют резко неоднородные локальные внутренние напряжения, искажающие решетку. Тогда в местах резкой локализации напряжений могут образоваться домены с антипараллельным направлением спинов. Вследствие огромной величины внутренних напряжений и резко выраженному направлению минимума энергии такие домены будут достаточно устойчивы в отношении действия внешнего магнитного поля; будут сохранять противоположное полю расположение спинов даже тогда, когда спины всех окружающих доменов, не лежащих в месте резкой локализации напряжений, будут составлять с полем небольшие углы. В этом случае на домены с антипараллельным направлением спинов, кроме внешнего, будет действовать подмагничивающее поле $\bar{a}$ со стороны всех окружающих доменов; суммарное поле будет $H + \bar{a}$. При этом член A/H^2 , появление которого в законе подхода к насыщению как раз и связывается с существованием резко неоднородных локальных напряжений, будет иметь теперь более сложный вид, а именно $A/(H + \bar{a})^2$.

Таким образом, закон приближения к насыщению мартенсита и продуктов его отпуска можно представить в следующем виде:

$$x = \frac{A}{(H + \bar{a})^2} + \frac{B_0}{H^3} + x_p. \quad (6)$$

B_0 и x_p определяются из теории Акулова. Раскладывая $A/(H + \bar{a})^2$ в ряд и ограничиваясь первыми двумя членами, получим:

$$x = \frac{A}{H^2} - \frac{2\bar{a}A}{H^3} + \frac{B_0}{H^3} + x_p = \frac{A}{H^2} - \frac{(2\bar{a}A - B_0)}{H^3} + x_p = \frac{A}{H^2} - \frac{B}{H^3} + x_p, \quad (7)$$

$$B = 2\bar{a}A - B_0.$$

Следовательно, неоднородные локальные внутренние напряжения приводят не только к появлению члена A/H^2 в законе приближения к насыщению, но и изменяют величину членов более высоких степеней. При достаточной величине локальных напряжений может измениться не только величина коэффициента при члене $1/H^3$, но и его знак, что, как мы видим, и подтверждается опытом.

Институт физики
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

Поступило
6 II 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. С. Акулов, Zs. f. Phys., 69, 822 (1931). ² Н. С. Акулов и Л. В. Киренский, ЖТФ, 9, в. 13 (1939). ³ R. Gans, Ann. d. Phys., 15 (1932). ⁴ W. F. Brown, Phys. Rev., 58, 736 (1940); 60, 139 (1941). ⁵ Э. Каминский, Г. Курдюмов и Л. Лейвикова, ЖТФ, 11, 1091 (1941). ⁶ Г. Курдюмов и Л. Лысак, ЖТФ, 17, 993 (1947). ⁷ Л. С. Мороз и Ю. С. Терминасов, ЖТФ, 19, в. 3 (1949).